

AUTOREFERAT DOTYCZĄCY OSIĄGNIĘĆ
NAUKOWO-BADAWCZYCH KANDYDATA DO
STOPNIA DOKTORA HABILITOWANEGO



Dr inż. Paweł Różga
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki,
Informatyki i Automatyki
Politechniki Łódzkiej

1. Dane osobowe i kontaktowe

Dr inż. Paweł Rózga
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź
e-mail: pawel.rozga@p.lodz.pl
tel.: 42 631-26-76
tel. kom.: 609-725-622

2. Uzyskane tytuły i stopnie naukowe – z podaniem miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

- 09/2009 - Doktor nauk technicznych w zakresie Elektrotechniki;
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki (EEIA),
Politechnika Łódzka;
tytuł rozprawy: „Rola otuliny izolacyjnej na elektrodzie WN w mechanizmie rozwoju wyładowań elektrycznych w oleju transformatorowym”;
promotor: dr hab. inż. Józef Galczak, prof. PŁ;
(Praca wyróżniona przez Radę Wydziału EEIA).
- 07/2003 - Magister inżynier Elektrotechniki;
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Świętokrzyska;
dyplom z oceną bardzo dobrą (5,0).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Czas zatrudnienia	Stanowisko	Miejsce zatrudnienia
09.2009 - do chwili obecnej	Adiunkt (pełen etat)	Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej
10.2008 - 09.2009	Asystent (pełen etat)	Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej
02.2008 - 09.2008	Asystent (1/3 etatu)	Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej

4. Osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zm)

4.1 Wskazane osiągnięcie naukowo-badawcze

Jako osiągnięcie naukowo-badawcze wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki Habilitant wskazuje cykl 14 publikacji tematycznych opatrzonych tytułem:

Ocena porównawcza sposobu propagacji wyładowań elektrycznych w elektroizolacyjnych estrach biodegradowalnych i oleju mineralnym przy udarze napięciowym piorunowym w małych przerwach układu elektrod ostrze-izolowana płyta

4.2 Wykaz publikacji dotyczących wskazanego osiągnięcia naukowo-badawczego.

Lp.	Publikacja	IF (Punkty MNiSW)
1.	Rozga P.: The Influence of Paper Insulation on the Prebreakdown Phenomena in Mineral Oil under Lightning Impulse, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation , Vol. 11. No. 3, 2011, pp. 720-727 - (100 %) . doi: 10.1109/TDEI.2011.5931058	1,094 (25)
2.	Rozga P., Cieslinski D., Stanek M., Kaczmarek M.: Measurement Techniques Used for Study the Electrical Discharge Mechanisms in Insulating Ester Fluids under Lightning Impulse, Advances in Electrical and Computer Engineering , Vol. 14, No. 3, 2014, pp. 95-100 - (70 %) . doi: 10.4316/AECE.2014.03012	0,529 (15)
3.	Rozga P., Stanek M., Cieslinski D.: Comparison of properties of electrical discharges developing in natural and synthetic ester at inception voltage, 2013 IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2013) , Shenzhen, China, 20-23.10.2013, pp. 891-894 (dostępna w bazie IEEEExplore i indeksowana w bazie Web of Science) - (80 %) . doi: 10.1109/CEIDP.2013.6748243	0 (15)
4.	Rozga P., Stanek M.: Characteristics of streamers developing at inception voltage in small gaps of natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, IET Science, Measurement and Technology , Vol. 10, No. 1, 2016, pp. 50-57 - (80 %) . doi: 10.1049/iet-smt.2014.0313	0,954 (20)
5.	Różga P.: Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, Przegląd	0 (10)

	Elektrotechniczny , nr 1'2014, s. 245-247 - (100 %) . doi:10.12915/pe.2014.01.63	
6.	Rozga P.: Positive streamer propagation in small gap of synthetic ester under lightning impulse, 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2014) , Bled, Slovenia, 30.06-03.07.2014, pp. 1-4 (dostępna w bazie IEEEExplore i indeksowana w bazie Web of Science) - (100 %) . doi: 10.1109/ICDL.2014.6893076	0 (15)
7.	Różga P.: Rozwój wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym przy napięciu udarowym piorunowym, Przegląd Elektrotechniczny , nr 2'2015, s. 14-17 - (100 %) . doi: 10.15199/48.2015.02.01	0 (14)
8.	Rozga P.: Streamer propagation in small gaps of synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation , Vol. 22. No. 5, 2015, pp. 2754-2762 - (100 %) . doi: 10.1109/TDEI.2015.005101	1,306 (25)
9.	Rozga P., Stanek M.: Positive streamer propagation in natural ester and mineral oil under lightning impulse, International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015) , Pilzno, Czechy, 23-28.08.2015, Paper 73 (dostępna przez portal CIGRE) - (80 %) . doi: brak	0 (0)
10.	Rozga P.: Streamer propagation in a non-uniform electric field under lightning impulse in short gaps insulated with natural ester and mineral oil, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences , Vol. 64, No. 1, 2016, pp. 171-179 - (100 %) . doi: 10.1515/bpasts-2016-0019	1,087 (20)
11.	Różga P.: Wyładowania elektryczne w dielektrykach ciekłych w polu nierównomiernym przy napięciu udarowym piorunowym - mechanizm i metody badawcze, Rozdz. w monografii X Forum "Transformatory Energetyczne" , s. 117-164, 2015, ISBN: 978-83-940283-1-2 - (100 %) . doi: brak	0 (8)
12.	Rozga P.: Using the three-parameter Weibull distribution in assessment of threshold strength of pressboard impregnated by different liquid dielectrics, IET Science, Measurement and Technology , e-first, 2016, 6 pages - (100%) doi: 10.1049/iet-smt.2016.0061	0,954 (20)
13.	Rozga P.: Using the light emission measurement in assessment of electrical discharge development in different liquid dielectrics under lightning impulse voltage, Electric Power Systems Research (Elsevier) , e-first, 2016, 8 pages - (100 %) doi: 10.1016/j.epsr.2016.06.009	1,809 (35)
14.	Rozga P.: Streamer propagation and breakdown in very small point - insulating plate gap in mineral oil and ester liquids at positive lightning impulse voltage, Energies , 2016, 9, 467 - (100 %) doi: 10.3390/en9060467	2,077 (25)

5. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

5.1. Aktualny stan wiedzy w zakresie inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych przy napięciu udarowym piorunowym

5.1.1. Ogólne wiadomości o cieczach dielektrycznych stosowanych w transformatorach

Transformatory energetyczne, w których jako czynnik izolacyjno-chłodzący stosowane są różnego typu ciecze dielektryczne, stanowią znaczącą większość wszystkich transformatorów eksploatowanych w systemie elektroenergetycznym na całym świecie. Pozostała grupa tj. transformatory suche (z izolacją żywiczną) oraz transformatory z izolacją z sześćiofluorku siarki (SF₆) stanowią margines eksploatowanych jednostek. Najczęściej stosowanym w transformatorach dielektrykiem ciekłym jest olej mineralny. Wynika to z dużej dostępności surowców do jego produkcji, stosunkowo niskiej ceny i względnie dużej stabilności chemicznej przy oddziaływaniu nań różnych czynników [1-8]. Jakkolwiek od kilkunastu lat na rynku transformatorowym intensywnie rozwijają się aplikacje, w których wykorzystywane są estry syntetyczne bądź naturalne stanowiące alternatywę dla olejów mineralnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko naturalne [9-26]. W przeciwieństwie do olejów mineralnych estry charakteryzują się bowiem wysokim poziomem biodegradowalności (90-99% przy ok. 10% biodegradowalności oleju mineralnego) oraz znacznie wyższą niż oleje mineralne temperaturą zapłonu (ponad 300 °C przy średniej dla olejów mineralnych równej 160 °C) [8-12, 17, 18, 20, 21]. Niemniej, w dalszym ciągu dominującym płynem elektroizolacyjnym stosowanym w transformatorach jest olej mineralny, co pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Zastosowanie cieczy elektroizolacyjnych w transformatorach różnego przeznaczenia

Typ transformatora	Rodzaj stosowanej cieczy elektroizolacyjnej		
	Powszechność stosowania cieczy: ****(bardzo duża), ***(duża), **(mała), *(brak)		
	Olej mineralny	Estry syntetyczne	Estry naturalne
Sieciowy	****	**	**
Rozdzielczy	****	***	***
Trakcyjny	****	***	**

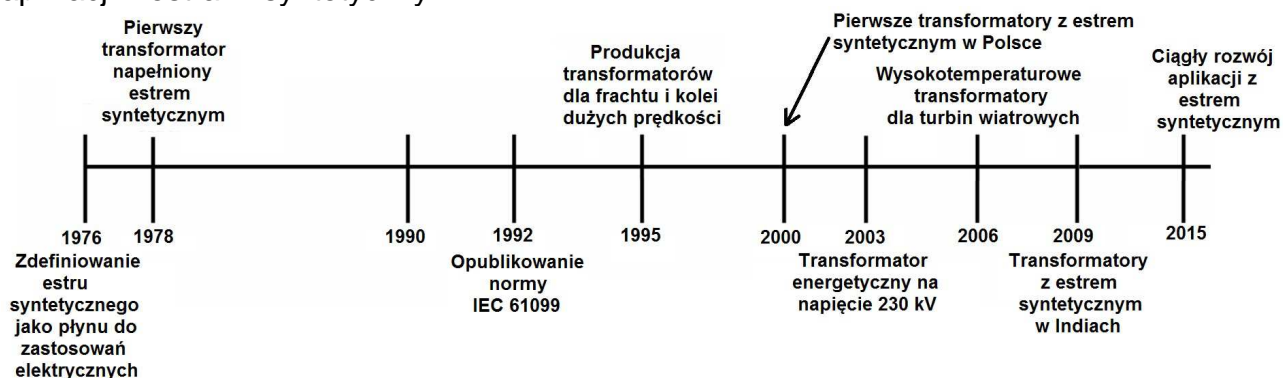
Oleje mineralne w aplikacjach elektroenergetycznych występować mogą w wielu odmianach. Wynika to z faktu, że pozyskiwane są one na drodze destylacji ropy naftowej o różnym stopniu zawartości poszczególnych węglowodorów (parafinowych, naftenowych i aromatycznych) i to przekłada się na finalny produkt, jakim jest olej transformatorowy. Głównie stosowane są dwa typy olejów mineralnych w transformatorach:

- oleje parafinowe - które są pochodną ropy naftowej zawierającej znaczne ilości naturalnie występujących n-parafin; cechują się stosunkowo wysoką temperaturą krzepnięcia, co wymaga dodatkowych środków zmniejszających krzepliwość;
- oleje naftenowe - są pochodną ropy naftowej, która zawiera bardzo małe ilości naturalnie występujących n-parafin lub ich brak; posiadają bardzo niską temperaturę krzepnięcia, lepsze parametry lepkości oraz dłuższą żywotność.

Węglowodory aromatyczne ze względu na brak odporności na utlenianie, którego produktem jest lepki, gęsty szlam są frakcją usuwaną z olei izolacyjnych. Oleje mineralne

mogą zawierać inhibitory, które spowalniają proces utleniania oleju. Ciecz występuje w postaci inhibitowanej, zawierającej spowalniacze syntetyczne, oraz nieinhibitowanej, gdzie występują inhibitory typu naturalnego [2-4, 6-8, 19, 27].

W przeciwieństwie do olejów mineralnych znanych w przemyśle elektroenergetycznym od prawie 100 lat, badania nad estrami syntetycznymi do zastosowań elektrycznych rozpoczęto dopiero w latach 70-tych ubiegłego wieku. Pierwszy transformator wypełniony estrem syntetycznym został oddany do eksploatacji w roku 1978 i od tego czasu intensywnie rozwijano ten rodzaj dielektryka ciekłego oraz aplikacje z nim związane. Obecnie estry syntetyczne stosowane są głównie w transformatorach rozdzielczych, w rozwiązaniach gdzie za najważniejszy aspekt stawiane jest bezpieczeństwo przeciwpożarowe, a więc m.in. w kolejach dużych prędkości oraz w budynkach, gdzie występować mogą duże skupiska ludności. Obserwuje się jednak ciągły wzrost zarówno mocy jak i napięć, na jakie budowane są nowe jednostki napełniane tymi płynami [12-15, 19-22, 28]. Rysunek 1 pokazuje schematycznie "oś czasu" dla rozwoju aplikacji z estrami syntetycznymi.



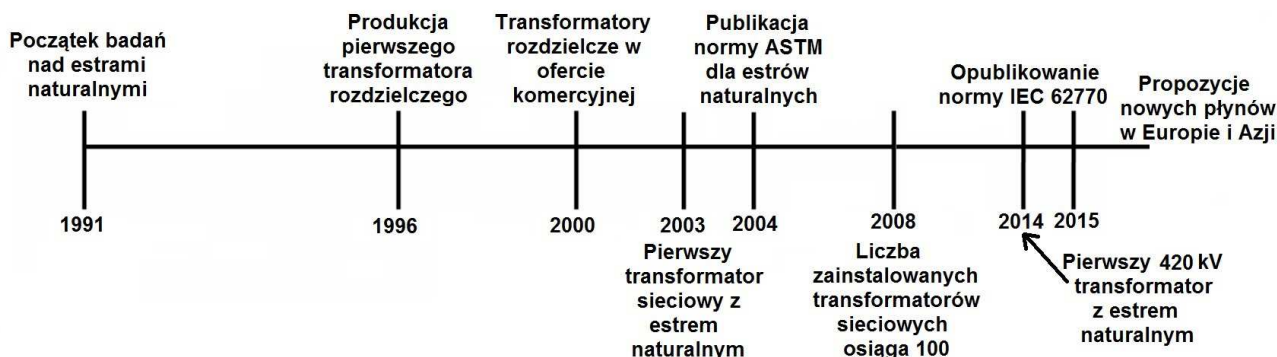
Rys. 1. "Oś czasu" dla aplikacji z estrami syntetycznymi

Estry syntetyczne są związkami chemicznymi utworzonymi w wyniku reakcji alkoholu i kwasu tłuszczowego. Zwykle są produktem reakcji polioliu (cząsteczka o więcej niż jednej grupie hydroksylowej) z syntetycznymi lub naturalnymi kwasami karboksylowymi. W cząsteczce różne grupy kwasów (zwykle 2, 3 lub 4) są przyłączone do centralnej struktury polioliu. Aby zapewnić estrom stabilną strukturę chemiczną w łańcuchu stosowane są zazwyczaj kwasy nasycone (o podwójnych wiązaniach C=C). Najpowszechniejszym na rynku estrem syntetycznym do zastosowań elektrycznych jest obecnie płyn Midel 7131, wyprodukowany na bazie tetraestru pentaerytrytoli o grupach alkilowych R od C₅H₁₁ do C₉H₁₉ [12, 17, 19]. W ostatnim czasie na rynku promowany jest też produkt o nazwie Envirotemp 200, który stanowi dodatkową ofertę do znanego w przemyśle transformatorowym płynu tej samej kompanii tj. estru naturalnego Envirotemp FR3.

Zainteresowanie płynami pochodzenia roślinnego pojawiło się natomiast z początkiem lat 90-tych ubiegłego wieku. Było to podyktowane głównie wysoką ceną estrów syntetycznych, a więc potrzebą znalezienia tańszego odpowiednika dla nich, spełniającego takie same wymagania środowiskowe oraz przeciwpożarowe. "Oś czasu" dla rozwoju aplikacji z estrami naturalnymi prezentuje rysunek 2.

Estry naturalne otrzymywane są przez tłoczenie nasion roślin oleistych (soja, rzepak, kanola itp.), szczególnie tych, które charakteryzują się bardzo krótkim okresem wzrostu. Estry naturalne powstają w wyniku reakcji glicerolu z trzema cząsteczkami naturalnie występujących kwasów tłuszczowych. W wyniku powyższej reakcji, można otrzymać nasycone kwasy tłuszczowe lub nienasycone kwasy tłuszczowe z jednym,

dwoma lub trzema wiązaniami podwójnymi w łańcuchu węglowodorowym. Zdecydowaną zaletą nasyconych kwasów tłuszczowych jest ich stabilność chemiczna, natomiast dominującą wadą jest wysoka lepkość. Potrójnie nienasycone kwasy tłuszczowe cechują się natomiast niższą lepkością, ale są bardzo niestabilne chemicznie, chociażby z powodu dużej podatności na utlenianie. W celu uzyskania pożądanej stabilności na utlenianie koniecznym jest dodawanie do płynu odpowiednich substancji ograniczających ten proces. Najpopularniejszym antyoksydantem jest DBPC (butylowany hydroksytoluen). Całkowita zawartość tej substancji nie może jednak przekraczać 1%. Powyżej tej wartości zauważono wzrost przewodności cieczy powyżej akceptowalnej wartości. Stwierdzono, że ciecze o dużej zawartości procentowej mono nienasyconych kwasów tłuszczowych najbardziej nadają się do pracy, ponieważ charakteryzują się one najniższą lepkością, jednocześnie będąc w miarę stabilnymi chemicznie. Oleje uzyskiwane z nasion roślin są charakteryzowane poprzez względne ilości poszczególnych kwasów tłuszczowych [9-11, 17-21]. Najpopularniejszym obecnie komercyjnym estrem naturalnym jest wspomniany już płyn Envirotemp FR3, który produkowany jest z nasion soi. Z początkiem roku 2014 na rynku europejskim pojawił się jako nowość płyn Midel eN zaś rynek azjatycki (Chiny, Indie) rozpoczął intensywną promocję własnych rozwiązań w tym zakresie. Ciekawym i oryginalnym rozwiązaniem w obszarze estrów naturalnych (dostępność na rynku od 2015 roku) jest ester naturalny o obniżonej lepkości o nazwie rynkowej Nomex® 970 FLD. W estrze tym zwiększono zawartości mono nienasyconych kwasów tłuszczowych uzyskując w stosunku do trój-glicerydów poziom 50/50 %. Takie rozwiązanie przyczyniło się do znaczącego obniżenia lepkości cieczy jednakże spowodowało także obniżenie temperatury zapłonu do ok. 200 °C obniżając tym samym klasę palności tego płynu [23, 24, 28, 29].



Rys. 2. "Oś czasu" dla aplikacji z estrami naturalnymi

Każdy z w/w typów cieczy dielektrycznych musi spełniać określone wymagania w zakresie parametrów fizyko-chemicznych i dielektrycznych zapisanych w normach przedmiotowych. Wymagania te dla dielektryków ciekłych każdego z rodzajów są jednak opisane w innej, specjalnie dedykowanej dla danego płynu normie. I tak:

- dla oleju mineralnego w normie: PN-EN 60296: 2012 Ciecze stosowane w elektrotechnice -- Świeże mineralne oleje elektroizolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej;
- dla estru naturalnego w normie: PN-EN 62770: 2014 Ciecze stosowane w elektrotechnice -- Świeże naturalne estry do transformatorów i podobnych urządzeń elektrycznych (dostępna tylko w języku angielskim);

- dla estru syntetycznego w normie: PN-EN 61099: 2011 Ciecze elektroizolacyjne -- Wymagania techniczne dla świeżych syntetycznych estrów organicznych do zastosowań elektrycznych (dostępna tylko w języku angielskim).

W tabeli 2 zestawione zostały podstawowe parametry fizyko-chemiczne i dielektryczne poszczególnych typów cieczy dielektrycznych stosowanych w transformatorach. Parametry te pochodzą z kart katalogowych producentów i dotyczą świeżych płynów w postaci przez nich dostarczonej, bez zastosowania jakiegokolwiek ich obróbki.

Tabela 2. Podstawowe parametry estru syntetycznego, naturalnego i oleju mineralnego na przykładzie wybranych płynów komercyjnych.

	Jednostki	Ester syntetyczny (Midel 7131)	Ester naturalny (FR 3)	Ester naturalny o obniżonej lepkości (Nomex 970FLD)	Olej mineralny (Shell Diala)
Właściwości fizykochemiczne					
Gęstość w 20 °C	kg / dm ³	0,97	0,92	0,89	0,88
Ciepło właściwe w 20 °C	J / kg K	1880	1884	1950	1860
Przewodność cieplna w 20 °C	W / m K	0,144	0,177	0,147	0,126
Lepkość kinematyczna w 100 °C	mm ² / s	5,25	8,0	4,6	2,6
Temperatura krzepnięcia	°C	-60	-21	-28	-50
Temperatura zapłonu	°C	316	360	200	170
Temperatura palenia	°C	260	316	-	150
Klasyfikacja zagrożenia pożarowego według IEC 61100 / IEC 61039	-	K3	K2	0	0
Biodegradowalność	%	89	97	75	10
Właściwości dielektryczne					
Napięcie przebicia	kV	> 75	> 75	75	70
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ w 90 °C	-	< 0,008	0,02	0,04	< 0,002
Przenikalność elektryczna w 20 °C	-	3,2	3,1	2,8	2,2

Wszystkie płyny podobnie spełniają kryteria odnośnie przemiennej napięcia przebicia (określanego zgodnie z normą IEC 61099). Co nie zostało pokazane, a jest faktem istotnym, to większa niezależność tego napięcia od zawartości wilgoci w przypadku estrów. Podczas gdy napięcie przebicia dla oleju mineralnego spada już przy zawartości wilgoci na poziomie 20-30 ppm, dla estrów utrzymuje się ono na stałym poziomie do pewnej granicznej wartości wynoszącej ok. 300 ppm dla estrów naturalnych i blisko 600 ppm dla estru syntetycznego. Olej mineralny jest względnie stabilnym płynem jeśli chodzi o współczynnik strat dielektrycznych. Dla obu rodzajów estrów parametr ten gwałtownie rośnie już przy niewielkiej obróbce w postaci przepompowywania czy podgrzewania. Pozytywnym aspektem, jeśli chodzi o estry, jest natomiast wartość ich przenikalności elektrycznej, która zdecydowanie bardziej niż w przypadku olejów mineralnych zbliżona jest do przenikalności izolacji stałej stosowanej w transformatorach (papier czy preszpan). Tak więc, ze względu na mniejsze różnice w przenikalnościach pomiędzy izolacją stałą a ciekłą, można spodziewać się bardziej równomiernego rozkładu pola elektrycznego w układach papier-ester niż papier-olej mineralny. Z kolei wysoka gęstość i lepkość estrów nie wpływa korzystnie na efektywność chłodzenia. Przepływ gęstej i lepkiej cieczy

w wąskich kanałach olejowych jest utrudniony, stąd konieczne jest uwzględnienie tego faktu przy projektowaniu takich kanałów w transformatorach, szczególnie wyższych napięć (od 110 kV wzwyż). Z reguły są one szersze, co zwiększa gabaryty transformatora i jednocześnie ilość cieczy jaką trzeba go napełnić. Wzmiankowany wyżej ester naturalny o obniżonej lepkości w pewnym zakresie jest w stanie zapobiec konieczności zmian konstrukcyjnych, gdy konieczne jest zastosowanie jako izolacji ciekłej estru właśnie. Jakkolwiek, w aspekcie efektywności chłodzenia, wyższa przewodność cieplna estrów w stosunku do oleju mineralnego, wpływa pozytywnie na zdolność do odprowadzania ciepła od powierzchni uzwojeń. Co już zostało napisane wyżej, estry syntetyczne i naturalne ulegają łatwej biodegradacji i są trudnopalne, co jest istotną pozytywną cechą z punktu widzenia właściwości związanych z ochroną środowiska [9-15, 17-26, 28, 29].

Skomplikowanym i ważnym problemem przy ocenie porównawczej różnych cieczy dielektrycznych jest ich wytrzymałość udarowa rozumiana jako zachowanie się w warunkach przepięć indukowanych udarami uwzględniające sposób inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych pod wpływem takiego typu narażeń. To zagadnienie właśnie stanowiło podstawę rozważań naukowo-badawczych habilitanta, które poddane są ocenie w ramach niniejszego wniosku. Nieodzowne jest, aby przedstawiając własne dokonania w tym zakresie nie odnieść się w pierwszej kolejności do danych literaturowych dotyczących teorii inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych przy udarach napięciowych piorunowych.

5.1.2 Inicjacja i propagacja wyładowań w cieczach - wprowadzenie

Mechanizm inicjacji i rozwoju wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych oraz przebicia przy napięciu udarowym piorunowym jest tematem obszernych badań co najmniej od lat 50-tych ubiegłego wieku kiedy to pojawiły się pierwsze prace w tym zakresie [30-34]. W kolejnych latach starano się usystematyzować wiedzę o procesach odpowiedzialnych za przebicie w cieczach [35-46] by następnie, wraz z rozwojem technik foto-optycznych, które umożliwiły śledzenie rozwoju czasowo-przestrzennego tych wyładowań w fazie przedprzebiciowej, zaproponować szereg teorii dotyczących fizycznej natury tych wyładowań. Metody ultraszybkiej fotografii takie jak metoda refrakcyjna, cieniowa czy smugowa pozwoliły na obserwację kształtu przestrzennego form wyładowczych [37, 38, 43, 45-62], natomiast ich uzupełnienie pomiarem czasu propagacji, na oszacowanie szybkości propagacji - jednego z fundamentalnych parametrów opisujących wyładowania elektryczne w cieczach. Nieodzownym instrumentem pomiarowym w badaniach eksperymentalnych dotyczących wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych stał się fotopowielacz jako element pozwalający rejestrować światło emitowane przez rozwijające się wyładowania. Światło to na etapie poprzedzającym przebicie charakteryzuje się stosunkowo niewielkim natężeniem, a dodatkowo ulega w cieczy rozproszeniu i pochłanianiu, tak więc należy do jego detekcji użyć niezwykle czułego instrumentu o parametrach umożliwiających tę detekcję, i takim właśnie instrumentem jest wspomniany fotopowielacz. Wyniki otrzymane z jego użyciem (sekwencja dyskretnych impulsów światła o czasach narastania rzędu pojedynczych nanosekund obserwowanych zarówno w fazie inicjacji jak i rozwoju wyładowań) potwierdziły teorię mówiącą o skokowym charakterze propagacji wyładowań rozwijających się przy narażeniach napięciowych natury udarowej [39, 42, 44-46, 48, 49, 51, 53-57, 62, 63]. Większość prac badawczych zmierzająca do rozeznania mechanizmów odpowiedzialnych za inicjację i propagację wyładowań elektrycznych w cieczach prowadzona była z użyciem układów elektrod gołych typu ostrze-płyta, a więc w układów o skrajnie nierównomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego. Stosowanie takiego

właśnie układu elektrod wynikało z kilku powodów. Po pierwsze uzyskiwano pewność, co do miejsca inicjacji wyładowań, które każdorazowo rozwijało się od ostrzowej elektrody będącej pod potencjałem wysokiego napięcia (WN). Pozwoliło to na zawężenie obszaru obserwowanego w czasie prowadzenia prac eksperymentalnych z użyciem metod optycznych. Z drugiej strony układy ostrzowe nie wymagają tak wysokich napięć inicjujących, jakie są potrzebne w przypadku układów o quasi-równomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego przy zastosowaniu takich samych przerw elektrodowych. W układach ostrzowych możliwe jest też obserwowanie wyładowań niezupełnych, które nie doprowadzają do przebicia, a które stanowią cenne źródło informacji o inicjacji oraz wstępnej fazie rozwoju wyładowań elektrycznych. Finalnie zaś, układy typu ostrze-płyta w pewnym zakresie imitować mogą defekty rzeczywistych układów izolacyjnych, w których niejednorodności stanowią miejsca o lokalnie zwiększonym natężeniu pola elektrycznego, i w ich okolicy może dojść do zainicjowania wyładowania podczas przepięcia.

Pewną odmianą układów gołych elektrod ostrze-płyta są układy z zastosowaniem płyty preszpanowej ułożonej na płaskiej elektrodzie uziemionej. Takie rozwiązanie hamuje rozwój wyładowań doprowadzających do przebicia, co umożliwia wykonanie pomiarów i analiz zachowania się poszczególnych cieczy w szerszym zakresie napięć probierczych. Poza tym, układy takie mogą symulować w większym stopniu niż układy elektrod gołych rzeczywiste sytuacje mogące pojawić się w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych. Gdy pojawi się niejednorodność i dojdzie w jej obrębie do zainicjowania wyładowania, wyładowanie takie nigdy nie będzie rozwijać się do przewodzącego elementu metalowego - na jego drodze zawsze pojawi się hamujący jego rozwój element izolacji stałej [3, 6, 54, 55, 58-60, 62, 64-70]. Właśnie w takim układzie habilitant przeprowadził oryginalne autorskie badania dotyczące inicjacji i rozwoju wyładowań elektrycznych w wybranych dielektrykach ciekłych pod wpływem napięcia udarowego piorunowego. Miały one na celu porównać te ciecze ze sobą z punktu widzenia zachodzących na danym poziomie napięcia probierczego mechanizmów wyładowczych. Wybranymi dielektrykami ciekłymi były dwie ciecze estrowe jako nierozpoznane jeszcze dostatecznie dielektryki ciekłe, które stanowią obecnie alternatywę dla oleju mineralnego użytego także w badaniach, ale jako ciecz odniesienia.

5.1.3 Pojęcie "strimera" w odniesieniu do wyładowań elektrycznych w cieczech

Pojęcie "strimera" jest pojęciem znanym i ściśle zdefiniowanym w odniesieniu do teorii wyładowań elektrycznych w gazach, gdzie oznacza dojrzałą lawinę elektronową o liczności elektronów rzędu 10^9 , która rozwijając się w przestrzeni między elektrodami zwykle doprowadza do przeskoku. Charakterystyczna prędkość "strimera" propagującego w powietrzu wynosi ok. 10^6 m/s. Kanał strimera w gazach to słabo przewodząca (niskotemperaturowa) plazma [2, 6, 60, 71].

W przypadku cieczy pojęcie "strimer" nie jest już tak jednoznaczne. Używa się go do opisu szeregu zjawisk, tzw. przedprzebiciowych (z ang. pre-breakdown phenomena), które zachodzą w cieczy po zainicjowaniu wyładowania i nie zawsze muszą zakończyć się przebiciem. Różnorodność tych zjawisk nie pozwala właśnie na jednoznaczne zdefiniowanie pojęcia "strimer" dla procesów wyładowczych w cieczech. U źródła stosowania tego pojęcia w odniesieniu do cieczy dielektrycznych jest podobieństwo do udarowego wyładowania strimerowego rozwijającego się w gazach (tzw. ulotu udarowego). Fotograficznie zarejestrowany ulot dodatni w powietrzu jest w swojej formie przestrzennej bardzo podobny do strimerów dodatnich rozwijających się w oleju przy

napięciu udarowym [47, 72]. Charakterystyczną cechą strimerów w cieczach jest fakt różnicy we współczynniku załamania światła pomiędzy nimi a otaczającym je ośrodkiem. Właśnie to zjawisko wykorzystywane jest w technikach optycznych umożliwiających wykonanie fotografii strimerów w fazie rozwoju [36-38, 43, 47, 51, 52, 58-62].

Jak wspomniano, inicjacja strimerów w cieczy, a następnie ich propagacja poprzedzają przebicie dielektryka ciekłego. Nie dzieje się tak jednak każdorazowo, gdyż zdarzają się przypadki, kiedy zainicjowany strimer nie doprowadzi do przebicia, szczególnie gdy rozwija się przy napięciu inicjacji lub w układzie elektrod izolowanych bądź przynajmniej w układzie z elektrodą uziemioną pokrytą płytą izolacyjną. W pierwszym przypadku rozwijają się tzw. "stopping length streamers", które zanikają w przestrzeni międzyelektrodowej po osiągnięciu pewnej odległości od inicjującej elektrody WN [53, 56, 57, 70]. W drugim zaś, gdy płyta izolacyjna pokrywa elektrodę uziemioną, strimery docierając do niej rozprzestrzeniają się po jej powierzchni w formie wyładowań ślizgowych tworząc niekiedy tzw. kanał powrotny będący wynikiem sprzężenia pojemnościowego pomiędzy elektrodą WN a elektrodą uziemioną [55, 58, 59, 60, 62, 66-68].

Strimery w cieczach, podobnie jak w gazach, różnią się od siebie gdy porównamy je z punktu widzenia biegunowości napięcia, przy którym się rozwijają. Zmiana cech charakterystycznych strimerów związana jest także z etapami ich rozwoju wynikającymi z kształtu fali napięciowej, wartości napięcia, natężenia pola elektrycznego związanego z geometrią elektrod czy choćby ciśnienia hydrostatycznego. Cechami tymi są m.in. kształt przestrzenny strimerów, ich zasięg, szybkość propagacji, prąd i ładunek oraz intensywność emitowanego światła. Tak więc posługując się pojęciem strimera w opisie wyładowań elektrycznych w cieczach należy robić to z dużą ostrożnością, zdając sobie sprawę z wyraźnych różnic pomiędzy definicją tego pojęcia w aspekcie teorii wyładowań elektrycznych w gazach a próbami zaaplikowania go w nazewnictwie form wyładowczych obserwowanych w cieczach. Stąd w literaturze, w odniesieniu do wyładowań elektrycznych w cieczach, często pomijana jest nazwa "strimer" na rzecz klasycznego nazewnictwa opisowego jak "wyładowanie elektryczne" [6, 51, 53-60, 64, 70, 71], "zjawiska przedwyładowcze" (z ang. "pre-discharges") lub "zjawiska przedprzebicowe" (z ang. "pre-breakdown phenomena") [37-46, 60, 62]. Niekiedy alternatywą związaną z kształtem przestrzennym strimerów jest nazywanie ich przymiotnikami związanymi z tym kształtem jak wyładowania drzewiaste (z ang. "tree-like"), krzewiaste (z ang. "bush-like") czy wyładowania nitkowate (z ang. "filamentary-like"). Istnieje także grupa badaczy, którzy definitywnie sprzeciwiają się stosowaniu pojęcia "strimer" do opisu zjawisk wyładowczych w cieczach. Sugerują oni stosowanie pojęcia "lider" [40, 41, 50, 51, 61], które w odniesieniu do dużych przerw powietrznych oznacza rozwój wyładowania o charakterze skokowym, co jest bliższe charakterowi wyładowań elektrycznych w cieczy. Co do jednoznaczności nazewnictwa kompromisu jednak nie ma.

W związku z powyższym w dalszej części opisu pojęcie strimer będzie używane tożsamo z pojęciem wyładowanie elektryczne, co można zauważyć także w autorskich pozycjach wnioskodawcy poddawanych ocenie w ramach wniosku habilitacyjnego.

5.1.4 Inicjacja wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych - zarys teorii i stanu wiedzy

5.1.4.1 Wpływ geometrii elektrod (promienia krzywizny elektrody WN) na napięcie inicjacji wyładowań

W badaniach inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych najczęściej stosowanym układem modelowym jest układ ostrze-płyta, a więc układ o skrajnie nierównomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego. O zaletach związanych z jego stosowaniem wspomniano już wyżej. W odniesieniu do aspektu inicjacji wyładowań elektrycznych w cieczach układy ostrzowe mają jeszcze jedną zaletę, a mianowicie łatwo można z ich użyciem modelować wpływ zmiany natężenia pola elektrycznego (maksymalnej jego wartości wynikającej z geometrii elektrod) na zjawisko inicjacji poprzez zmiany promienia krzywizny ostrza. Niezależnie więc od tego, jaki mechanizm determinuje inicjację wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych i jaka jest biegunowość napięcia, które napręża badany układ elektrod, to natężenie pola elektrycznego związane z geometrią elektrod uznano za jeden z najistotniejszych parametrów w aspekcie oceny mechanizmów inicjacji wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych [30-33, 35-37, 46, 48, 53, 67, 73-78]. W układach o nierównomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego (ostrze-płyta) natężenie to zależy w głównej mierze od promienia krzywizny elektrody ostrzowej, a w znacznie mniejszym stopniu od odległości pomiędzy elektrodami (wolnej przerwy olejowej). Mając wyznaczone eksperymentalnie napięcie inicjacji określić można w sposób przybliżony maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego przy ostrzu powodującą inicjację wyładowań. Wieloletnie badania pozwoliły wypracować dla układów typu ostrze-płyta wzór, który umożliwia w sposób przybliżony wyznaczenie tego natężenia bez stosowania metod numerycznych. Niezbędnymi dla obliczeń jest posiadanie wiedzy o:

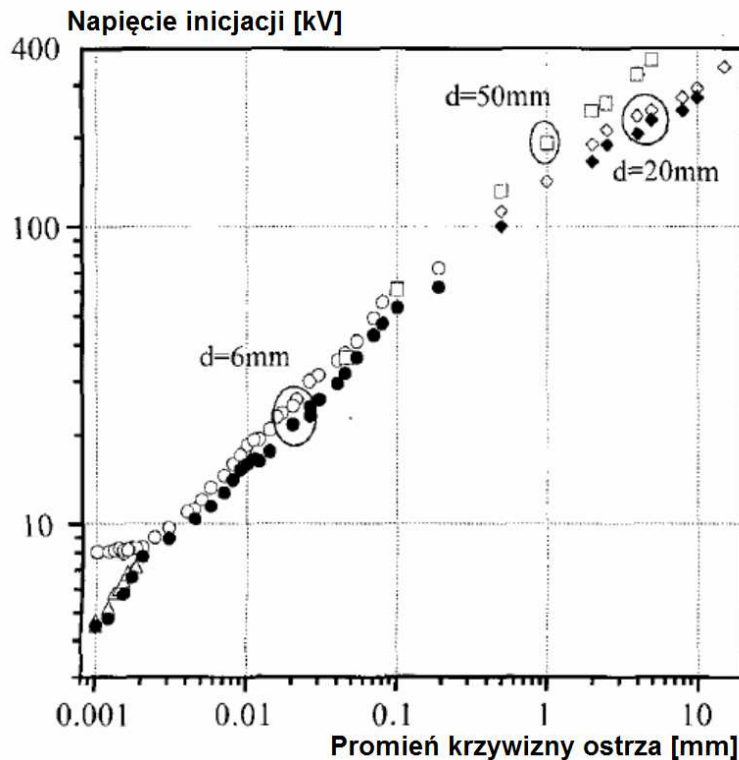
- wartości napięcia inicjacji U_i (lub V_i w pozycjach anglojęzycznych), które jest najczęściej pomierzone eksperymentalnie,
- promieniu krzywizny elektrody WN "r",
- odległości międzyelektrodowej "d".

Wzmiankowany wzór ma postać:

$$E_i = \frac{2U_i}{r \cdot \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \quad (1)$$

Badania eksperymentalne pozwoliły określić więc typowe wartości natężenia pola elektrycznego, przy których następuje inicjacja wyładowań przy napięciu impulsowym na 1-10 MV/cm, przy czym w pojedynczych przypadkach wartości powodujące inicjację mogą być niższe, rzędu 0,5-1 MV/cm [30-33, 48, 51, 73-78]. Taka rozbieżność w wartościach natężenia pola elektrycznego inicjacji wynika z kilku istotnych faktów. Po pierwsze, ogólnie niższe wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji dotyczą układów elektrod o równomiernym i quasi-równomiernym rozkładzie pola elektrycznego, gdzie wpływ znanego powszechnie efektu powierzchni oraz efektu objętości na wytrzymałość takich układów zanurzonych w oleju został zaobserwowany. Jeśli zaś chodzi o układy o polu nierównomiernym, niższe wartości natężenia pola elektrycznego inicjacji obserwuje się przy większym promieniu krzywizny elektrody ostrzowej, co tłumaczy się faktem zwiększenia powierzchni tej elektrody, a więc, jak w przypadku układów o rozkładzie

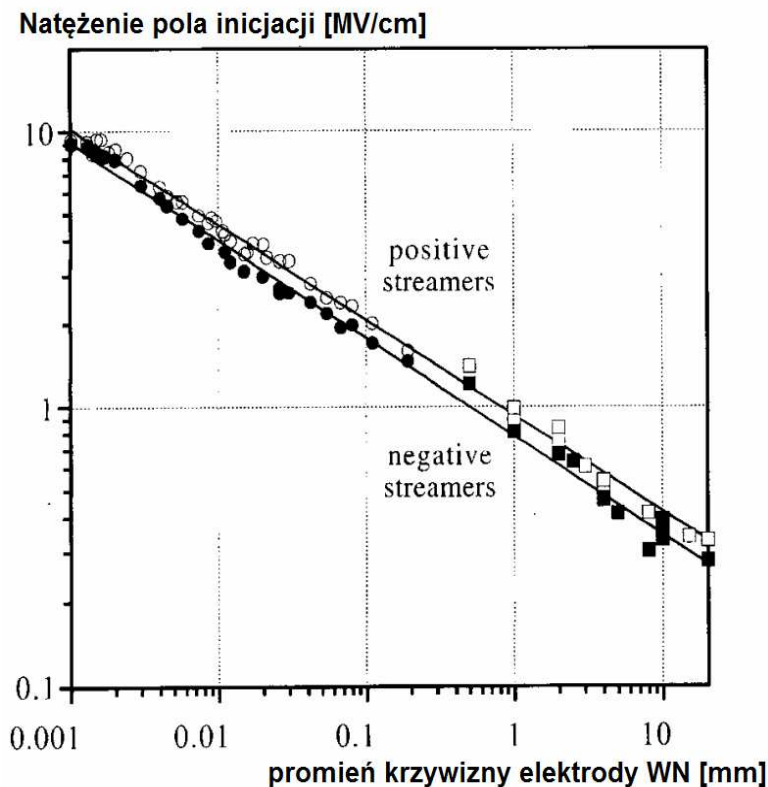
quasi-równomiernym pola wpływem efektu powierzchni. Wyższe wartości są natomiast typowe dla układów o niewielkich promieniach zaokrąglenia elektrody ostrzowej WN. Jakkolwiek, ważnym jest, aby pamiętać, że wzrost promienia krzywizny niesie za sobą wzrost napięcia inicjacji wyładowań przy zachowaniu tej samej przerwy elektrodowej. Ta zależność została pokazana na rysunku 3 [77], gdzie przedstawiono wyniki badań dla trzech różnych przerw elektrodowych w oleju mineralnym przy prawie prostokątnym wysokim napięciu impulsowym (0,4/1400 μ s). Promień zaokrąglenia elektrody ostrzowej zmieniany był w cytowanych badaniach w szerokim zakresie od 1 μ m do 20 mm.



Rys. 3. Zależność napięcia inicjacji dodatnich (otwarte symbole) i ujemnych (pełne symbole) strimerów od promienia krzywizny elektrody ostrzowej WN: dla $d = 6$ mm promień krzywizny zmieniany był od 1 μ m do 200 μ m), dla $d = 20$ i 50 mm promień krzywizny zmieniany był od 0,5 do 20 mm [77]

Zainicjowane wyładowania były wyładowaniami typu "stopping length", a więc niedocierającymi do elektrody uziemionej. Można więc uznać, że rozwijały się rzeczywiście przy minimalnej wartości napięcia, dla którego natężenie pola elektrycznego było na tyle niskie, że zainicjowane wyładowanie nie rozwinęło się do postaci kanału przebiciowego.

Wracając do zaprezentowanego wyrażenia (1), na rysunku 4 [77] przytoczono zależność natężenia pola elektrycznego inicjacji od promienia krzywizny elektrody inicjującej pokazujące wpływ efektu powierzchni powodującego obniżenie natężenia pola elektrycznego inicjacji ze wzrostem promienia krzywizny elektrody WN. Wartości na zaprezentowanym rysunku są rezultatem obliczeń z użyciem wzoru (1) bazując na wynikach pomiarów przedstawionych na rysunku 3. Wyniki te potwierdzają więc, że natężenia z zakresu 1-10 MV/cm są typowymi natężeniami pola elektrycznego inicjacji dla promieni krzywizny elektrody ostrzowej mniejszych od 1 mm.



Rys. 4. Zależność natężenia pola elektrycznego inicjacji dodatnich (otwarte symbole) i ujemnych (pełne symbole) strimerów od promienia krzywizny elektrody ostrzowej WN obliczone na bazie równania (1) i wyników pomiarów z Rys. 3 [77]

W danych warunkach probierczych inicjacja wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych może jednak zajść przy niższych wartościach natężenia pola elektrycznego. Można wyciągnąć takie wnioski bazując na wynikach badań dotyczących wytrzymałości udarowej niektórych czystych węglowodorów. Otrzymane wartości natężenia pola elektrycznego, przy którym w danych warunkach dochodzi do przebicia, oceniono na 1 do 2 MV/cm, a więc inicjacja wyładowań elektrycznych, które nie rozwiną się do postaci powodującej przebicie, powinna mieć miejsce przy znacznie niższym natężeniu pola elektrycznego niż to, charakterystyczne dla przebicia. Oczywiście rozważania te są zależne w dużym stopniu od użytych konfiguracji elektrod, a szczególnie, od rozpatrywanych przerw międzyelektrodowych w oleju. W przypadku niewielkich przerw (do maksymalnie 5 mm) i użycia gołych elektrod inicjacja wyładowania praktycznie każdorazowo wiąże się z przebiciem, a więc wytrzymałość elektryczna rozważana w kategorii natężenia pola elektrycznego jest tożsama z natężeniem pola elektrycznego inicjacji. Podobnie jest w przypadku układów o polu równomiernym. Niektóre publikacje podają również, bazując na rozważaniach teoretycznych dotyczących natury fizykochemicznej 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, obliczono na 7 do 20 MV/cm, przy czym znów wartości podane 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 zajść 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 przewodze 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 o tzw. czystości laboratoryjnej, dla których w rozważaniach nie brano pod uwagę możliwości pojawienia się w ich objętości cząstek zanieczyszczeń stałych lub pęcherzyków gazowych [36, 36, 48, 73-79].

5.1.4.2 Teorie inicjacji wyładowań w cieczach

Inicjację wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych o czystości technicznej, a więc takich, które nie są pozbawione słabych punktów w postaci pęcherzyków gazowych bądź zanieczyszczeń, opiera się, niezależnie od biegunowości napięcia, na zjawisku inicjacji wyładowań w takim pęcherzyku bądź generacji pęcherzyka gazowego w otoczeniu elektrody WN w wyniku pewnych procesów elektro-fizycznych. Zainicjowane wyładowanie główne rozwija się następnie poprzez rozrost takiego pęcherzyka. W przypadku biegunowości dodatniej mówi się o generacji pęcherzyków bądź wskutek oddziaływania ciepła Joula (a) bądź jako wynik kawitacji będącej rezultatem oddziaływania sił elektromechanicznych na ciecz (b). Za decydujący proces przyczyniający się do inicjacji wyładowań ujemnych uznaje się natomiast emisję polową zwaną także emisją elektrostatyczną (c).

a) oddziaływanie ciepła Joula:

Badania eksperymentalne szczegółowo opisane w [48, 73, 80, 81] wykazały, że przed osiągnięciem przez napięcie impulsowe wartości szczytowej skutkującej inicjacją wyładowania elektrycznego możliwe jest zarejestrowanie impulsów prądowych o niewielkiej wartości (ok. 10^{-5} A). Wraz z impulsami prądowymi pojawiają się udarowe fale ciśnienia będących wynikiem formowania się przestrzeni kawitacyjnych w okolicy ostrza. Zarejestrowany prąd emitowany przez niewielki punkt ostrza w krótkim czasie (od 10 do 100 ns) może dostarczyć na tyle dużo ciepła, że wystarcza ono na odparowanie niewielkiej objętości cieczy w pobliżu tego ostrza. Zakłada się, że proces ten może mieć miejsce, gdy lokalne natężenie pola elektrycznego wynikające z geometrii elektrod sięga ok. 10 MV/cm, a wartość prądu emitowanego z niewielkiego punktu o powierzchni $0,1 \mu\text{m}^2$ jest rzędu 100 nA. Wzrost temperatury w takim procesie jest wystarczający, w czasie typowym dla opóźnienia inicjacji wyładowania, by spowodować odparowanie niewielkiej objętości cieczy. Teorię tą potwierdzają badania wpływu ciśnienia na zjawisko inicjacji wyładowań m.in. w cykloheksanie. W badaniach tych wraz ze zwiększaniem ciśnienia od atmosferycznego do ok. 7 MPa w rejestrowanym prądzie wyładowań zawsze widoczny był ciągły prąd związany z prądem odpowiedzialnym za odparowanie cieczy, zaś impulsy związane z rozwojem wyładowania stopniowo malały, by dla 7 MPa zaniknąć zupełnie. Dodatkowo zwiększanie ciśnienia powiększało napięcie inicjacji wyładowań. W takim wypadku energia potrzebna do odparowania cieczy musiała być więc wyższa.

b) kawitacja elektrostatyczna:

Druga z teorii odnosząca się do dodatniej biegunowości napięcia mówi, że wyładowania rozpoczynają się w mikropęcherzykach wypełnionych parą cieczy. Pęcherzyki te tworzą się w wyniku procesu kawitacji zachodzącej na skutek oddziaływania sił elektromechanicznych na warstwę cieczy przylegającą do powierzchni metalu elektrody o dużej krzywiznie lub znajdującej się w pobliżu mikro-nierówności na elektrodzie quasi-płaskiej. W obu przypadkach lokalne pole elektryczne osiągnąć może wartości rzędu 1-10

MV/cm, a więc wystarczającej do zainicjowania wyładowania. Możliwość pojawienia się lokalnych zaburzeń kawitacyjnych na granicy metal-ciecz w postaci pęcherzyków inicjujących została uznana ogólnie jako wprost proporcjonalna do iloczynu ϵE^2 , gdzie E jest wartością natężenia pola elektrycznego wynikającą z przyłożonego napięcia, zaś ϵ przenikalnością elektryczną cieczy [74, 76].

c) emisja elektrostatyczna:

W przypadku biegunowości ujemnej mechanizm inicjacji jest nieco lepiej rozeznany. Za decydujący proces przyczyniający się do inicjacji wyładowań ujemnych uznaje się emisję polową (elektrostatyczną). Kiedy natężenie pola elektrycznego przekroczy pewną wartość krytyczną (w przypadku biegunowości ujemnej mówi się o natężeniu powyżej 2,5 MV/cm) z elektrody ostrzowej generowane są szybkie elektronowe lawiny, które następnie indukują fale ciśnienia, a ich końcowym efektem jest powstanie pęcherzyków. W nich to następuje rozwój głównego kanału wyładowczego. Proces ten jest niezależny od ciśnienia. Powiązanie inicjacji wyładowań ujemnych z generowanymi falami ciśnienia jest potwierdzone fotografiami wyładowań w fazie inicjacji, gdzie generowane fale są bardzo dobrze widoczne, nawet gdy sam kanał wyładowania trudno wyraźnie rozeznac [76, 80, 82].

5.1.5 Propagacja wyładowań elektrycznych w cieczach

5.1.5.1 Ogólna charakterystyka poszczególnych faz rozwoju

Niezależnie od tego, z jaką cieczą dielektryczną mamy do czynienia, istnieją pewne uniwersalne zależności, które są prawdziwe dla każdej z nich. Zależności te wypracowano na przestrzeni wieloletnich badań dokonując klasyfikacji poszczególnych faz wyładowań na bazie obserwacji ich rozwoju czasowo-przestrzennego ze szczególnym uwzględnieniem szybkości propagacji jako najbardziej wiarygodnego wskaźnika zmian sposobu propagacji.

Generalnie klasyfikacja wyładowań rozwijających się w cieczach związana jest z pojawianiem się kolejnych ich faz wraz ze zwiększającym się napięciem probierczym odniesionym do napięcia inicjacji (znacznie częściej) lub napięcia przebicia (rzadko) w danych warunkach probierczych. Klasyfikację wyładowań pierwszy wprowadził Hebner [41] nadając poszczególnym fazom kolejne numery porządkowe. Rozwinięciem podejścia Hebnera jest natomiast powszechnie już stosowana numeracja zaproponowana przez Lesainta i jego współpracowników [48, 53, 56, 57] dzieląca wyładowania, niezależnie od biegunowości przy której się rozwijają, 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 wyładowań.

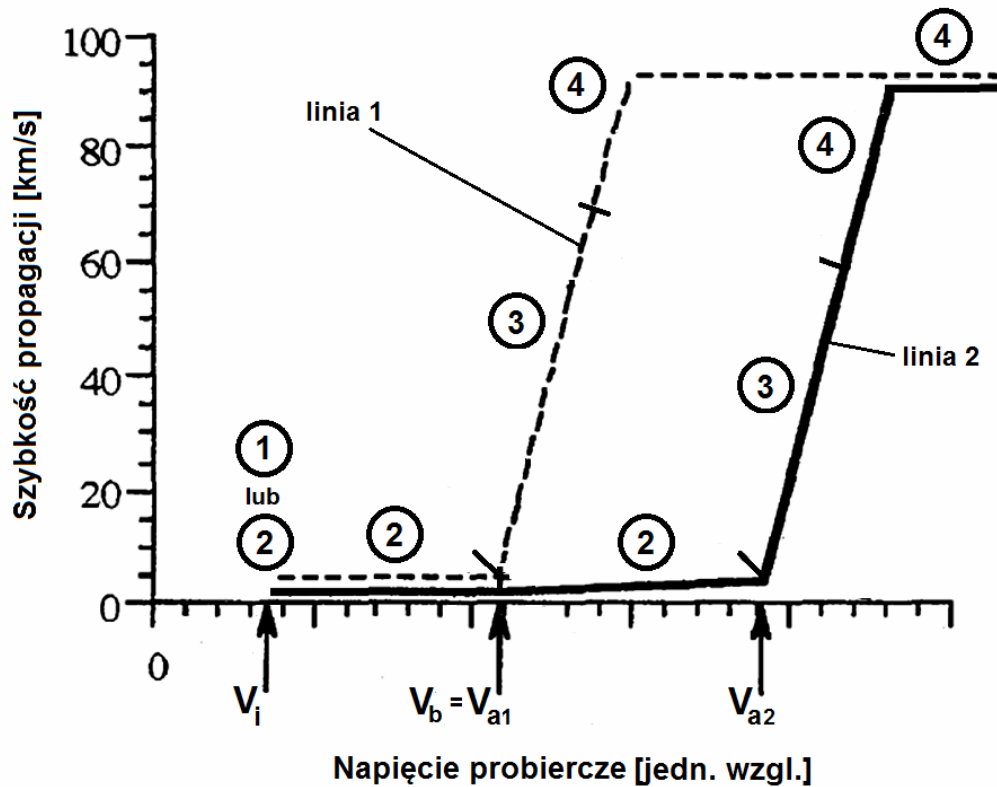
W tabeli 3 zestawiono ogólny podział faz rozwoju wyładowań z uwzględnieniem biegunowości napięcia probierczego z przytoczonymi szybkościami propagacji charakterystycznymi dla każdej z nich.

Tabela 3. Szybkość propagacji wyładowań dla poszczególnych faz rozwoju

Rodzaj wyładowania	Wyładowanie dodatnie	Wyładowanie ujemne
1-ego rodzaju	ok. 0,1 do 1 km/s	ok. 0,1 do 1 km/s
2-ego rodzaju	1-4 km/s	0,5-2 km/s
3-ego rodzaju	20-50 km/s	10-20 km/s
4-ego rodzaju	100 km/s	100 km/s

Nie tylko szybkość propagacji jest charakterystyczną cechą rozróżniającą poszczególne etapy rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach. Istnieje ścisła korelacja pomiędzy rodzajem, kształtem wyładowań, szybkością propagacji oraz intensywnością światła emitowanego przez wyładowanie i jego prądem. Szczególnie wyraźnie rozróżnialne jest przejście z fazy wyładowań powolnych na szybkie, a więc z wyładowania rodzaju 2-go na wyładowania rodzaju 3-go. Ze zmianą szybkości propagacji zmienia się znacząco wygląd rejestrowanego fotograficznie obrazu wyładowania, jak również inna jest charakterystyka światła emitowanego przez wyładowanie oraz jego prąd.

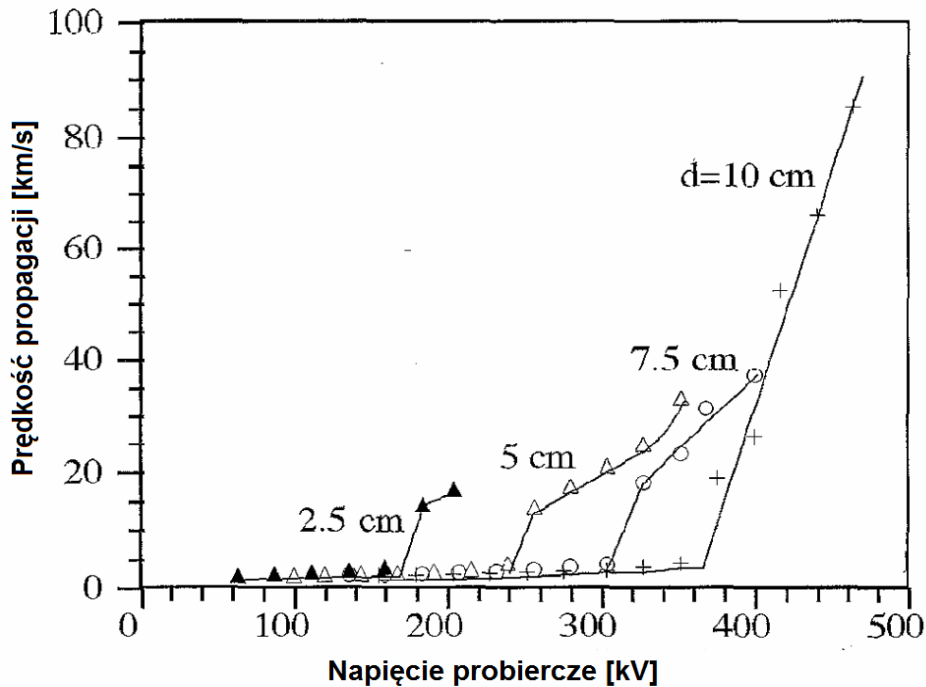
Rysunek 5 [41] pokazuje ogólną, możliwą do zaobserwowania w rzeczywistych warunkach probierczych układu ostrze-płyta, idealizowaną zależność zmian szybkości propagacji wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych od napięcia probierczego. Zależność taka umożliwia wskazanie charakterystycznych punktów i wartości napięć skorelowanych z poszczególnymi etapami rozwoju wyładowań. Przytoczono dwie typowe zależności dla dodatniej biegunowości udaru napięciowego piorunowego: linia ciągła (nr 2) dotyczy klasycznych olejów mineralnych, linia przerywana (nr 1) cieczy estrowych. Przy napięciu biegunowości ujemnej zależności są zbliżone, z tym, że szybkości propagacji dla wyładowań 3-go rodzaju są nieco niższe, a załamanie odpowiednich linii następuje przy wyższym napięciu niż w przypadku biegunowości dodatniej. Przy napięciu inicjacji mogą rozwijać się wyładowania 1-go bądź 2-go rodzaju, przy czym te pierwsze są bardzo trudne do uchwycenia i ich rozpatrywanie jest w zasadzie w literaturze pomijane. Wynika to z faktu, że mogą się one rozwinąć tylko w specyficznych warunkach probierczych tj. od elektrody igłowej o bardzo niewielkim promieniu krzywizny ($< 10 \mu\text{m}$) i w cieczy o niskiej temperaturze wrzenia. W takich cieczach bowiem do odparowania cieczy i generacji pęcherzyka gazowego potrzeba dużo niższej energii. W typowych dielektrykach ciekłych do zastosowań komercyjnych taka sytuacja nie ma miejsca. Najczęstszym przypadkiem jest więc zainicjowanie bezpośrednio strimerów 2-go rodzaju. Te rozwijać się mogą z prędkością do kilku km/s, przy czym strimery dodatnie posiadają zawsze wyższą (nawet 2-krotnie) szybkość propagacji niż strimery ujemne. Pierwszą formą wyładowań 2-go rodzaju są tzw. strimery typu "stopping length" czyli takie, które po zainicjowaniu zanikają w przestrzeni międzyelektrodowej po osiągnięciu pewnej odległości od inicjującej elektrody WN. Propagacja tego typu wyładowań jest hamowana z powodu niskiej wartości pola elektrycznego istniejącego w pewnym oddaleniu od ostrza oraz niewielkiemu wpływowi ładunku przestrzennego pochodzącego od samego wyładowania, które wspólnie nie są w stanie podtrzymać procesów jonizacyjnych w kanale strimera. Dla napięcia probierczego wyższego niż napięcie inicjacji pojawiają się strimery 2-go rzędu, które propagują najczęściej aż do elektrody uziemionej powodując rozwinięcie się kanału przebiciowego (oznaczenie V_b na rysunku 5 dotyczące linii ciągłej). Taka sytuacja ma zwykle miejsce w przypadku mineralnych olejów transformatorowych i większości ciekłych węglowodorów. Alternatywą dla takiego przypadku może być pojawienie się wyładowań 3-go rodzaju po przekroczeniu pewnej granicznej wartości napięcia probierczego oraz przebicie wskutek rozwoju właśnie wyładowań szybkich (linia przerywana na rysunku 5). Taka sytuacja z kolei jest charakterystyczna głównie dla dielektrycznych estrów oraz niewielkiej liczby węglowodorów ciekłych [48, 49, 51, 53, 54, 60, 66, 68, 83-89].



Rys. 5. Zależność szybkości propagacji wyładowań w cieczach od przyłożonego napięcia: V_i - napięcie inicjacji, V_b - napięcie przebicia (breakdown voltage), V_{a1} , V_{a2} - napięcia przyspieszenia (acceleration voltage); 1,2,3,4 - kolejne fazy rozwoju strimerów w cieczy [41]

Charakterystyczna wartość napięcia probierczego, dla którego następuje rozwój wyładowań szybkich (3-go rodzaju) nosi nazwę napięcia przyspieszenia (z ang. acceleration voltage) i w literaturze oznaczana jest powszechnie jako V_a . Nazwa ta wynika z faktu, że przy tym napięciu strimery w cieczach zmieniają szybkość propagacji z pojedynczych km/s na kilkanaście bądź kilkadziesiąt km/s, a więc znacząco następuje przyspieszenie ich propagacji. Jak widać wyraźnie na rysunku 5, moment przyspieszenia strimerów może być różny dla różnych cieczy. Może zdarzyć się sytuacja, gdy napięcie przyspieszenia pokryje się z napięciem przebicia w danym układzie elektrod i dla danej cieczy dielektrycznej (linia 1 z rysunku 5) lub, gdy napięcie przyspieszenia będzie znacznie wyższe od napięcia przebicia (linia 2 z rysunku 5). Wpływ na napięcie przyspieszenia i pośrednio także na napięcie przebicia ma też długość przerwy elektrodowej w układzie igła-płyta.

Na rysunku 6 pokazany został przykład literaturowy wyznaczonych zależności szybkości propagacji od napięcia dla różnych przerw w oleju mineralnym przy dodatnim udarze napięciowym 0.4/1400 μ s. Punkt załamania prostych wskazuje wartość napięcia przyspieszenia.



Rys. 6. Zależność prędkości propagacji od napięcia dla wybranych przerw w układzie ostrze- płyta w oleju mineralnym [53]

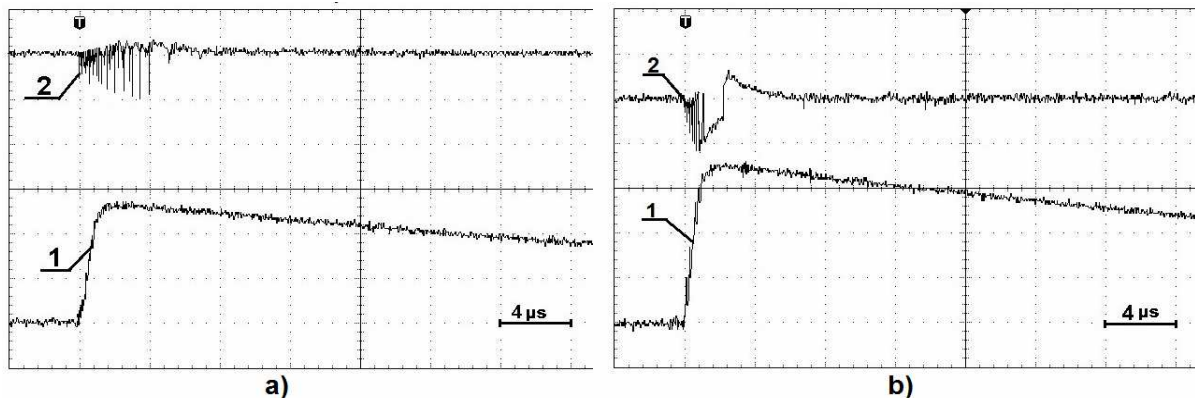
Na rysunku 5 wskazana została jeszcze możliwość rozwoju wyładowań elektrycznych 4-go rodzaju. Jest to jednak prawdopodobne tylko w sytuacji, gdy do układu elektrod doprowadzone zostanie napięcie kilkukrotnie przewyższające napięcie inicjacji (od 3 do 5 razy). Szybkość propagacji takich wyładowań to ok. 100 km/s, jednak rzadko prowadzone są badania dla takich krotności napięcia probierczego, ze względu na krótkie czasy rozwoju tego typu wyładowań (dziesiąte części μ s) i dużą energię wydzielaną podczas przebiegu.

Jak wspomniano na początku podrozdziału, każdy z rodzajów propagacji jest charakteryzowany nie tylko specyficzną szybkością propagacji, ale także odrębnymi właściwościami w zakresie kształtu strimerów rejestrowanych fotograficznie, odrębnymi przebiegami światła czy prądu. Poniżej w tabeli 4 przedstawione zostały charakterystyki dwóch najczęściej występujących w praktyce badań eksperymentalnych form wyładowań, a mianowicie wyładowań powolnych 2-go rodzaju oraz wyładowań szybkich 3-go rodzaju z podziałem na biegunowość napięcia. Spośród cech charakterystycznych wskazano typowe przebiegi światła emitowanego przez wyładowanie, przebiegi prądu wyładowania, fotografie smugowe oraz cieniowe [48, 49, 53, 54, 62, 67].

Patrząc na tabelę, różnice pomiędzy poszczególnymi fazami rozwoju najłatwiej zaobserwować można porównując zarejestrowane fotograficznie obrazy wyładowań oraz przebiegi światła i prądu. W mniejszym stopniu różnice są możliwe do uchwycenia na podstawie obrazów smugowych. W przypadku dodatnich wyładowań powolnych 2-go rodzaju rozwijające się strimery tworzą sferyczny twór, który wypełnia nitkowate kanały rozprzestrzeniające się wraz z penetracją przestrzeni elektrodowej. Symetryczność kształtu wynika z faktu kierowania się strimerów z przestrzeni pomiędzy elektrodami w obszar zwiększającego się natężenia pola elektrycznego. Jeśli chodzi o wyładowania ujemne 2-go rodzaju to tworzą one nieregularnie rozgałęzione struktury propagujące zarówno równoległe do osi wyznaczonej przez ostrze jak i w kierunkach bocznych. Zarówno dodatnie jak i ujemne strimery charakteryzują się skokową naturą propagacji.

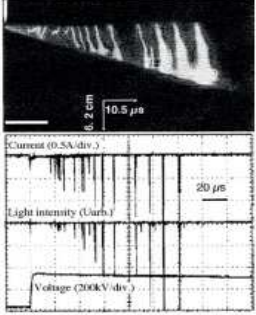
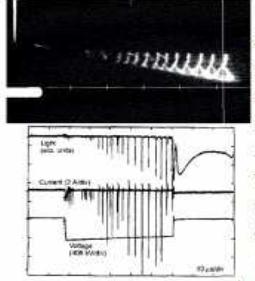
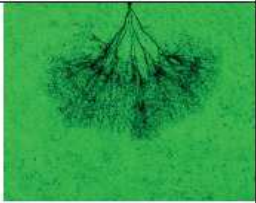
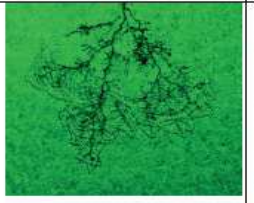
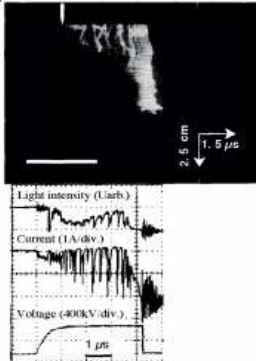
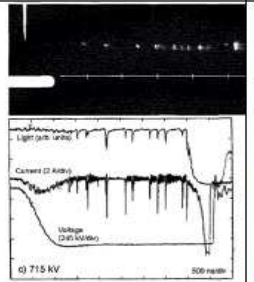
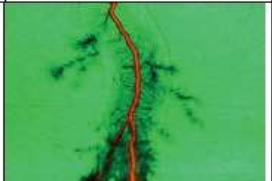
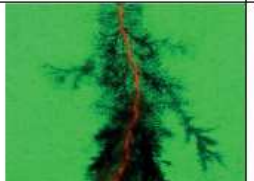
Impulsy prądu jak i światła następują po sobie z pewnymi interwałami czasowymi zwiększając z czasem propagacji wyładowania swoją wartość szczytową. Oznacza to, że w każdym kolejnym skoku światło emitowane jest z większą intensywnością, co potwierdzają także zaprezentowane obrazy smugowe. Każdy kolejny skok pociąga za sobą skokowe wydłużenie strimera i w takim wypadku strimer jako struktura rozpatrywana całościowo musi emitować więcej światła niż np. w stadium początkowym. Jeśli chodzi o strimery 3-go rodzaju to rozwijają się one głównie wzdłuż osi wyznaczonej przez elektrodę ostrzową z niewielkimi tylko rozgałęzieniami bocznymi. Wraz ze wzrostem napięcia liczba bocznych rozgałęzień maleje prowadząc w zasadzie do postaci strimera jako monokanału łączącego finalnie obie elektrody. Generalnie trudno rozeznaczyć na podstawie fotografii cieniowych czy dane wyładowanie 3-go rodzaju dotyczy dodatniej czy ujemnej biegunowości napięcia.

Obok zdecydowanych różnic w kształcie przestrzennym obrazów wyładowań rejestrowanych fotograficznie strimery 3-go rodzaju różnią się od swoich poprzedników także przebiegami czasowymi prądu i emitowanego światła. Szczególnie widoczne w przebiegach dotyczących strimerów 3-go rodzaju jest stałe tło, na tle którego rejestrowane są impulsy dyskretne. Taka forma nie jest widoczna, gdy wyładowanie rozwija się jako powolne. Isotną różnicą jest też częstotliwość impulsów świetlnych, która jest znacznie wyższa dla strimerów 3-go rodzaju. Na zaprezentowanych w tabeli 4 oscylogramach można wychwycić tę różnicę porównując podstawy czasu dla poszczególnych przypadków. Dla wyładowań 2-go rodzaju te podstawy to odpowiednio 10 i 20 μs , podczas gdy dla wyładowań 3-go rodzaju wynoszą one 1 μs . Oznacza to, że kolejne skokowe wydłużenia kanałów wyładowań zachodzą szybciej, a więc i procesy jonizacyjne odpowiedzialne za te wydłużenia są intensywniejsze. Aby lepiej zobrazować tę różnicę na rysunku 7 zestawiono porównawczo oscylogramy światła dla dwóch rodzajów wyładowań zarejestrowanych przy zastosowaniu tej samej podstawy czasu. Oba oscylogramy pochodzą z badań autorskich habilitanta z układu ostrze-izolowana płyta.



Rys. 7. Oscylogramy światła zarejestrowane dla różnych faz rozwoju wyładowań w estrze syntetycznym w układzie ostrze-izolowana płyta przy $d = 15 \text{ mm}$: a) strimery 2-go rodzaju typu "stopping length", $U = 55 \text{ kV}$, b) strimery 3-go rodzaju z generacją kanału powrotnego, $U = 70 \text{ kV}$; 1 - emitowane światło, 2 - udar napięciowy piorunowy (20 kV/dz.)

Tabela 4. Charakterystyka najczęściej występujących typów wyładowań w cieczach dielektrycznych

Sposób propagacji	Biegunowość napięcia	
	Dodatnia	Ujemna
Powolne – 2. rodzaju	 <p>Zapis smugowy wraz z przebiegiem światła i prądu zarejestrowany w układzie ostrze- płyta o przerwie 20 cm przy napięciu impulsowym 0,4/1400 μs</p>	 <p>Zapis smugowy wraz z przebiegiem światła i prądu zarejestrowany w układzie ostrze- płyta o przerwie 150 mm przy napięciu impulsowym 1/190 μs</p>
	 <p>Typowy kształt dodatniego strimera zarejestrowanego w układzie ostrze-izolowana płyta o przerwie 15 mm</p>	 <p>Typowy kształt ujemnego strimera zarejestrowanego w układzie ostrze-izolowana płyta o przerwie 15 mm</p>
Szybkie – 3. rodzaju	 <p>Zapis smugowy wraz z przebiegiem światła i prądu zarejestrowany w układzie ostrze- płyta o przerwie 10 cm przy napięciu impulsowym 0,4/1400 μs (końcowa faza rozwoju to wyładowanie 4. rodzaju)</p>	 <p>Zapis smugowy wraz z przebiegiem światła i prądu zarejestrowany w układzie ostrze- płyta o przerwie 150 mm przy napięciu impulsowym 1/190 μs</p>
	 <p>Typowy kształt dodatniego strimera zarejestrowanego w układzie ostrze-izolowana płyta o przerwie 20 mm wraz z widocznym kanałem powrotnym</p>	 <p>Typowy kształt ujemnego strimera zarejestrowanego w układzie ostrze-izolowana płyta o przerwie 20 mm wraz z widocznym kanałem powrotnym</p>

Podsumowując powyższe rozważania w tabeli 5 dokonano pewnego usystematyzowania typowych zjawisk możliwych do zaistnienia podczas rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach przy napięciu udarowym w układzie o polu skrajnie nierównomiernym wraz ze zwiększającym się napięciem probierczym odniesionym do

napięcia inicjacji. Ta systematyzacja dotyczy przypadku niewielkich przerw elektrodowych do 5 cm i olejów mineralnych. Zaznaczyć jednak należy, że wartości krotności napięć inicjacji mogą się nieco zmieniać w zależności od długości wolnej przerwy olejowej oraz rodzaju cieczy dielektrycznej (procentowy skład danego typu węglowodorów).

Tabela 5. Sekwencja zjawisk w układzie elektrod gołych ostrze- płyta przy napięciu udarowym

Lp.	Rodzaj zjawiska	Względna wartość napięcia odniesiona do napięcia inicjacji U_i
1.	Inicjacja wyładowania (strimery 1-go bądź 2-go rodzaju)	$U = U_i$
2.	Rozwój strimerów typu "stopping lenght" osiagających max. 80% danej przerwy elektrodowej	$U = 1,2 - 1,6 U_i$
3.	Propagacja powolnych strimerów 2-go rodzaju do elektrody uziemionej (zjawisko graniczne występujące bardzo rzadko)	$U = 1.4 - 1,6 U_i$
4.	Przebiecie jako wynik rozwoju powolnych strimerów 2-go rodzaju (z długimi czasami do przebiecia $> 10 \mu s$)	$U = 1,8 - 2,4 U_i$
5.	Przebiecie jako wynik rozwoju szybkich strimerów 3-go rodzaju (z krótkimi czasami do przebiecia $< 2 \mu s$)	$U = 2,4 - 3,2 U_i$
6.	Stabilizacja zjawisk tj. przebiecie jako wynik rozwoju wyładowań 3-go rodzaju, ale charakteryzowane bardzo krótkimi czasami do przebiecia ($< 1 \mu s$) i wysoką energią kanału przebieciowego	$U > 3 U_i$
7.	Przebiecie w wyniku rozwoju wyładowań 4-go rodzaju	$U > 3,5 U_i$

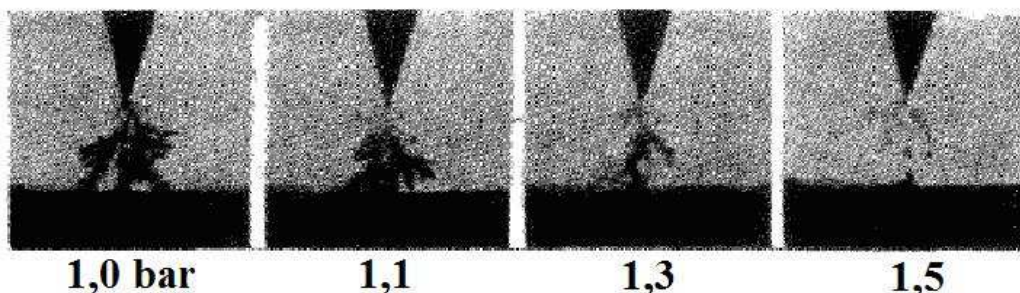
5.1.5.2 Teorie rozwoju wyładowań elektrycznych w cieczach

Zaprezentowane powyżej różnice pomiędzy strukturą wyładowań powolnych i szybkich są wynikiem odmienności w procesach jonizacyjnych determinujących zjawiska zachodzące podczas rozwoju wyładowań. Inne procesy determinują rozwój strimerów powolnych 2-go rodzaju, a inne rozwój strimerów szybkich rodzaju 3-go. W pierwszym przypadku rozpatruje się ten rozwój w oparciu o teorię jonizacji w fazie gazowej, podczas gdy rozwój szybkich strimerów wyjaśnia się w oparciu o teorię tzw. jonizacji w fazie ciekłej.

Teoria jonizacji w fazie gazowej mówi, że po zainicjowaniu wyładowania w pęcherzyku gazowym w pewnej chwili t_n od chwili doprowadzenia udaru do układu elektrod, jego rozwój następuje w wyniku procesów jonizacyjnych zachodzących bezpośrednio w jego wnętrzu. Innymi słowy kanał wyładowania elektrycznego wypełniony jest zjonizowanym gazem, a propagacja odbywa się wskutek kolejnych wyładowań zachodzących we wnętrzu kanału na skutek jonizacji zderzeniowej molekuł o niskim potencjale jonizacyjnym [30, 31, 33, 39, 44, 51, 60, 63]. Skutkiem wyładowań jest generacja gazu i wzrost jego ciśnienia u końca kanału prowadzący do jego skokowego wydłużenia. Kanał gazowy wypełnia wodór, który stanowi główny produkt wyładowań w oleju (80%) potwierdzony choćby badaniami DGA, które wskazują na wyładowania niezupełne w transformatorze, gdy stężenie wodoru w próbce oleju jest wysokie [90-93]. Dodatkowo fakt gazowej natury wyładowań powolnych potwierdzają między innymi badania spektroskopowe widma wyładowań w oleju, gdzie głównie linia H_α Balmera, ale także pozostałe linie wodorowe związana z procesem wzbudzenia atomów wodoru i ich powrotem do stanu niższego są najwyraźniej wyodrębnionymi liniami, jeśli chodzi o charakterystyczne długości fali (częstotliwości promieniowania) [90, 94-97]. Gdy wyładowanie rozwijające się w przestrzeni gazowej dochodzi do końca kanału jony dodatnie (w przypadku, gdy potencjał elektrody inicjującej jest dodatni) uderzają od środka w jego przednią ściankę powodując odparowanie cieczy i dysocjację zderzeniową cząsteczek oleju. W wyniku dysocjacji u końca kanału powstaje gaz, gwałtownie rośnie ciśnienie i w efekcie następuje jego skokowe wydłużenie, któremu towarzyszy dodatkowo

generacja udarowej fali ciśnienia. Rozwojowi wyładowania towarzyszą także rozbłyski światła, które są synchroniczne z impulsami prądu wyładowania. Ponieważ większość gazu stanowi wodór, jego jonizacja w wyniku wyładowania powoduje powstanie dodatnich jonów, których średnica jest daleko mniejsza od cząsteczek H_2 , a zatem ich średnia droga swobodna jest prawie tak długa jak elektronów. Dodatnie jony wodoru są zatem w procesie wyładowania znakomitymi pociskami mogącymi zdysocjować cząsteczki oleju u końca rozwijającego się kanału gazowego. Alternatywną możliwością jest dysocjacja w wyniku zderzeń cząsteczek cieczy z elektronami spływającymi do końca kanału z głębi cieczy, gdy kanał ten osiągnie potencjał elektrody inicjującej (kanał stanowi w takiej sytuacji niejako przedłużenie elektrody ostrzowej). Gdy wyładowanie dotrze do końca kanału musi zgasnąć. Kolejne wydłużenie kanału odpowiadające chwili t_{n+1} będzie miało miejsce, gdy nastąpi ponowny jego zapłon. Ten możliwy jest w sytuacji, gdy natężenie pola w miejscu inicjacji wyładowania osiągnie odpowiednio dużą wartość zbliżoną do natężenia inicjacji. Stanie się tak, gdy rozproszony zostanie dodatni ładunek przestrzenny, zgromadzony w otoczeniu elektrody inicjującej po poprzednim wyładowaniu. Rozproszenie to nastąpić może w wyniku dyfuzji oraz oddziaływania sił elektrostatycznych. W przypadku, gdy mamy do czynienia z ujemną elektrodą inicjującą, rolę pocisków pełnią oczywiście elektrony. Omówione kolejne skokowe wydłużenia kanału utożsamiane są z kolejnymi impulsami prądowymi, a także z impulsami światła rejestrowanymi z użyciem metod optycznych, kiedy podczas propagacji strimerów emitują one światło.

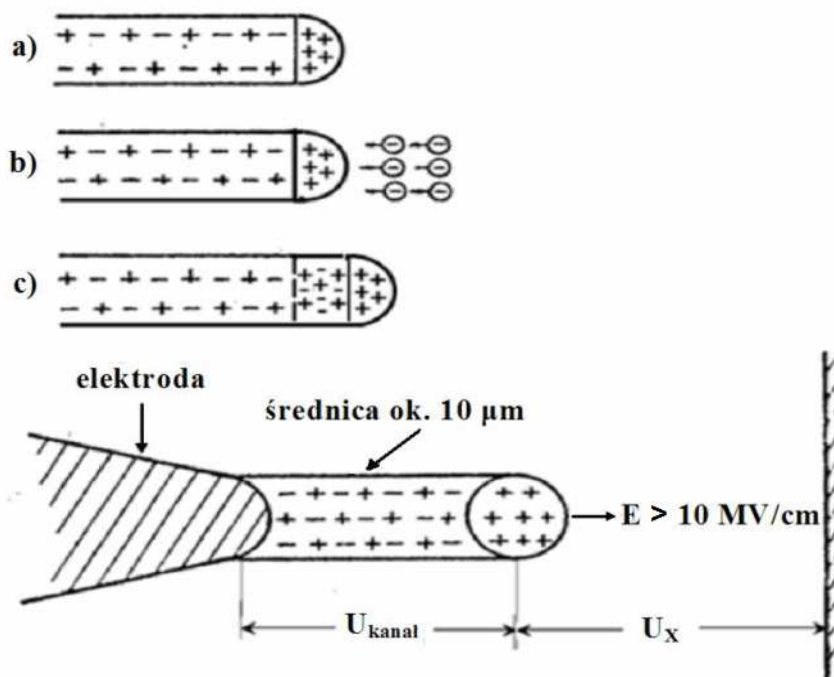
Za teorią jonizacji w fazie gazowej przemawiają argumenty, których liczba jest większa niż liczba argumentów ją negujących. Sam ten fakt może skłaniać do uznania słuszności tej teorii. Najważniejszym z tych faktów jest udokumentowany eksperymentalnie wpływ ciśnienia na rozwój wyładowań w węglowodorach ciekłych, a w szczególności wpływ na szybkość ich propagacji oraz obraz impulsów światła emitowanego podczas rozwoju wyładowania oraz impulsów prądu. Badania przeprowadzone przez Berouala w cykloheksanie i oleju transformatorowym [44, 51, 63] jednoznacznie wykazały, że wraz ze wzrostem ciśnienia liczba i amplituda impulsów prądu i światła maleje, przy czym dla ujemnej biegunowości napięcia i niezmiennej jego wartości układ nasycza się przy ciśnieniu ok. 20 barów [2 MPa] i powyżej tej wartości żadne impulsy nie są już rejestrowane. Analogiczne zjawisko zachodzi dla wyładowań dodatnich z tym, że graniczną wartością ciśnienia jest 30 barów [3 MPa]. Zwiększenie ciśnienia, przy tym samym napięciu, powoduje natomiast zmianę kształtu obrazów wyładowań rejestrowanych fotograficznie w aspekcie intensywności rozgałęzień. Na rysunku 8 pokazany został zestaw fotografii wykonanych w tych samych warunkach probierczych, w tej samej chwili czasowej Δt od momentu doprowadzenia napięcia, ale przy różnych wartościach ciśnienia dla wyładowań ujemnych rozwijających się w cykloheksanie [38].



Rys. 8. Wpływ ciśnienia na kształt wyładowań ujemnych w cykloheksanie: $U = 28$ kV, $d = 1$ mm, r (promień zaokrąglenia elektrody igłowej) = $5 \mu\text{m}$, $\Delta t = 7 \mu\text{s}$ [38]

Jonizacja w fazie gazowej, ze względu na stosunkowo niewielkie napięcia, do których jest odnoszona, a więc i niewielkie wartości natężenia pola elektrycznego, przypisywana jest jako mechanizm odpowiedzialny za rozwój powolnych wyładowań rodzaju 1-go i 2-go. Przekształcenie się wyładowań z powolnych w szybkie związane jest ze zmianą procesów jonizacyjnych i przyspieszeniem propagacji, za które odpowiada mechanizm jonizacji w fazie ciekłej.

Teoria jonizacji w fazie ciekłej bazuje na założeniu, że procesy jonizacyjne zachodzą w samej cieczy i to właśnie zjonizowana ciecz wypełnia kanały wyładowania. Zachodzące procesy jonizacyjne dotyczą już nie tylko molekuł o niskim potencjale jonizacyjnym, ale także i tych o wyższym potencjale, które mogą zostać pobudzone na skutek drgań emitując następnie kwanty energii związane z charakterystycznymi częstotliwościami promieniowania. Wartości natężenia pola, które dotyczą szybkich strimerów rozwijających się zgodnie z teorią jonizacji w fazie ciekłej zostały oszacowane na wyższe niż 30 MV/cm, a w pojedynczych przypadkach sięgające nawet 100 MV/cm. Wynika to ze znacznie wyższych napięć, przy których wyładowania szybkie zaczynają się pojawiać. Wartości te są wystarczające, aby wzbudzić bądź zjonizować tzw. twarde cząsteczki samej cieczy [36-39, 46, 51, 60]. Na rysunku 9 schematycznie pokazano rozwój kanału wyładowania jako rezultat jonizacji w fazie ciekłej.



Rys. 9. Rozwój kanału wyładowania jako efekt tzw. jonizacji w fazie ciekłej

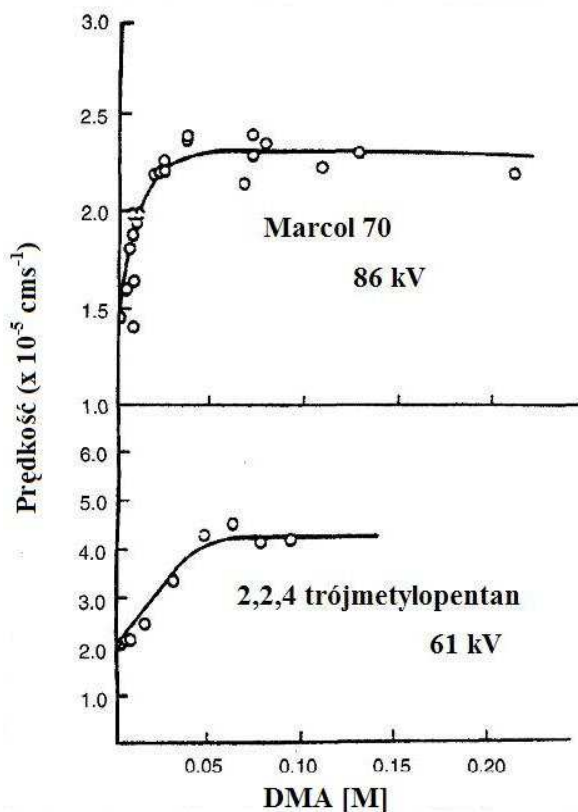
Fragment (a) z rysunku 9 symbolizuje kanał wyładowania dodatniego w czasie przerwy w propagacji. Kanałowi temu przypisuje się potencjał elektrody WN, gdyż jest on niejako jej przedłużeniem. Biorąc pod uwagę fakt, że kanał jest bardzo cienki, czasem nawet cieńszy niż samo ostrze elektrody WN, to pole elektryczne przed główką kanału może osiągać wartości natężenia pola elektrycznego znacznie przekraczające 10 MV/cm. W wyniku jonizacji polowej zachodzącej przed główką kanału strimera w przestrzeni przed nią pojawiają się elektrony oderwane od zjonizowanych cząstek obojętnych.

Fragment (b) pokazuje schematycznie jak kierują się one w stronę główki kanału. Alternatywą do zaprezentowanej sytuacji może być oczywiście jonizacja zderzeniowa.

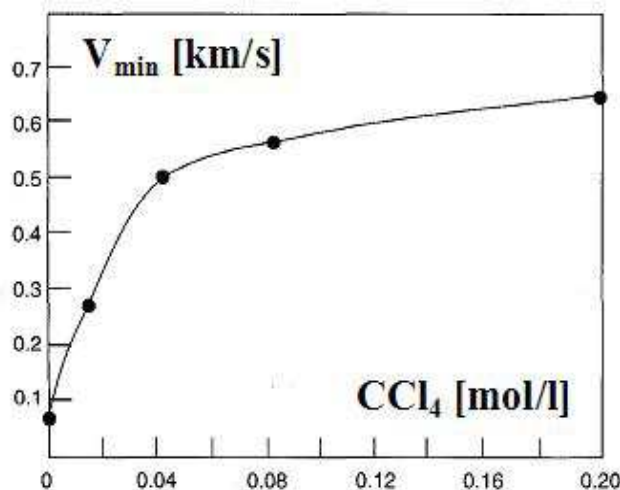
Wtedy elektrony z cieczy odklejają się od akceptorów w silnym polu wokół główki strimera i jonizują po drodze cząstki obojętne.

Na fragmentcie (c) pokazany jest już kolejny etap propagacji, kiedy elektrony wniknęły do kanału wyładowania i wskutek procesów jonizacyjnych w samym kanale wytworzyły z powstałym i znajdującym się w nim już ładunkiem dodatnim plazmę. Dodatni ładunek przestrzenny, który pozostawiony został po wniknięciu elektronów do kanału wyładowania tworzy teraz nową główkę kanału wydłużoną o elementarny odcinek. W przypadku wyładowań ujemnych elektrony poruszają się oczywiście od główki w głąb cieczy i im dalej od główki tym mniejsza jest ich energia kinetyczna. Elektrony te wychwytywane są przez tzw. akceptory, czyli cząstki o powinowactwie elektronowym, i tworzą ujemny ładunek przestrzenny, który staje się nową główką. W cienkiej warstwie wokół niej gdzie natężenie pola elektrycznego jest dostatecznie duże może nastąpić jonizacja polowa. Ze względu na znacznie większy, niż w przypadku kanału dodatniego promień zaokrąglenia główki kanału ujemnego, objętość cieczy o wysokim natężeniu pola elektrycznego jest znacznie mniejsza. Stąd wynika krótszy zasięg i niższa prędkość propagacji strimerów ujemnych.

W literaturze spotkać można szereg argumentów przemawiających za teorią jonizacji w fazie ciekłej, jak i argumentów poddających ją w wątpliwość. Argumentem o największym ciężarze gatunkowym „za” są wyniki badań, jakie przeprowadzono w szeregu węglowodorów ciekłych dotyczące wpływu substancji o niskim potencjale jonizacyjnym oraz tzw. zmiataczy elektronów na rozwój wyładowań. Z badań tych wynika, że następuje wyraźne przyspieszenie propagacji wyładowań dodatnich wskutek dodania związków o niskim potencjale jonizacyjnym. Z kolei wyładowania ujemne są przyspieszane w wyniku dodania tzw. zmiataczy elektronów. Powyższe wnioski zilustrowane są na przedstawionych na rysunkach 10 i 11 wykresach [36, 37, 39, 46, 51].



Rys. 10. Wpływ koncentracji DMA (dodatek o niskim potencjale jonizacyjnym) na szybkość wyładowań dodatnich rozwijających się w białym oleju naftenowym Marcol 70 oraz 2,2,4 – trójmetylopentanie [39]



Rys. 11. Wpływ koncentracji CCl₄ (zmiatacz elektronów) na szybkość wyładowań ujemnych rozwijających się w cykloheksanie pod wpływem napięcia udarowego: $d = 2$ mm, r (promień krzywizny ostrza) = 3 μ m, $U = 33$ kV [36]

Oprócz wpływu na szybkość wyładowań zaobserwowany został także wpływ dodatków na zasięg kanałów wyładowczych, co poniekąd jest ze sobą powiązane. Przytoczona wyżej substancja o niskim potencjale jonizacyjnym, DMA (dwumetyloanilina), powoduje wyraźne zwiększenie zasięgu kanałów dodatnich, a praktycznie nie wpływa na zasięg ujemnych wyładowań. Zmiatacz elektronów wyraźnie zmienił oprócz szybkości także kształt ujemnych tworów wyładowczych upodabniając je do tworów dodatnich. Rola zmiatacza elektronów polega na wychwytywaniu elektronów tuż za główką kanału powodując, że w cienkiej warstwie wokół główki powstaje ładunek przestrzenny o dużej gęstości, a zatem „nowa główka” zachowuje mały promień. W ten sposób natężenie pola na powierzchni główki pozostaje na wystarczająco dużym poziomie, aby mogła zachodzić intensywna jonizacja polowa. Drugim z wyraźnych argumentów przemawiających za słusznością teorii jonizacji w fazie ciekłej, jest udokumentowana w literaturze możliwość dokładnego obliczenia wytrzymałości elektrycznej węglowodorów o łańcuchu prostym i rozgałęzionym uwzględniająca założenie, że utrata energii elektronów następuje w wyniku pobudzenia do drgań wibracyjnych wiązań C-C w szkieletcie węglowym cząsteczki lub analogicznie wiązań C-H. Z argumentów przeciwnych jeden wydaje się mieć znaczenie największe: w kategoriach teorii jonizacji w fazie ciekłej nie da się wyjaśnić wpływu ciśnienia zarówno na prędkość propagacji wyładowań jak i napięcie przebicia [32, 40-42, 51].

Generalizując powyższe rozważania dotyczące teorii rozwoju wyładowań w cieczach można sformułować następujące wnioski:

- przy relatywnie niskich napięciach probierczych w odniesieniu do napięcia inicjacji (niższych wartościach natężenia pola elektrycznego) rozwijające się kanały wyładowcze są wypełnione gazem (obserwowany jest m.in. wpływ ciśnienia na zasięg kanałów), a prędkości, które uzyskują, są charakterystyczne dla powolnych wyładowań 1-go lub 2-go rodzaju;
- przy wyższych napięciach probierczych odniesionych do napięcia inicjacji (wyższych wartościach natężenia pola elektrycznego) kanał wyładowania wypełnia ciecz (wpływ ciśnienia nie jest widoczny), a prędkości osiągnęte przez wyładowania są rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu km/s, a więc typowe dla wyładowań rodzaju 3-go;

- przy pośrednich wartościach napięć wyładowanie może stanowić kanał wypełniony mieszaniną cieczy i gazu lub podczas rozwoju wyładowanie zmienić może swój charakter z powolnego na szybkie lub na odwrót.

Tak więc obie omawiane teorie jonizacji są słuszne, z tym, że teoria jonizacji w fazie gazowej odnosi się do wyładowań przy niższych napięciach probierczych (niższych natężeniach pola elektrycznego), zaś przy wyższych napięciach (wyższych wartościach natężenia pola) obowiązuje teoria jonizacji w fazie ciekłej.

5.2 Streszczenia artykułów wskazanych jako "szczególne osiągnięcie naukowe"

Przedstawione do oceny osiągnięcie naukowe związane jest z wykonaniem szeregu prac eksperymentalnych w samodzielnie przygotowanym układzie laboratoryjnym znajdującym się w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej. Prace te dotyczyły oceny wpływu standaryzowanego napięcia udarowego piorunowego obu biegunowości na inicjację i rozwój wyładowań elektrycznych w estrach biodegradowalnych (syntetycznym i naturalnym) będących alternatywą dla olejów mineralnych typowo stosowanych w transformatorach energetycznych. Zjawiska przedprzebiciowe występujące w alternatywnych cieczach dielektrycznych zostały ocenione na bazie porównania ich ze zjawiskami zachodzącymi w oleju mineralnym przy zachowaniu tych samych warunków probierczych uwzględniając fakt, że dla olejów mineralnych właśnie tworzone były dotychczasowe teorie inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych w cieczach.

Oryginalność prac polegała na wykonaniu badań w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta, który to układ nie był w takiej formie stosowany w badaniach prezentowanych w literaturze światowej dotyczących oceny zjawisk przedprzebiciowych w szerokim zakresie napięć probierczych odniesionych do statystycznie oszacowanego napięcia inicjacji wyładowań. Zastosowany układ elektrod, zdaniem autora, symuluje w większym stopniu zjawiska mogące się pojawić w rzeczywistych układach izolacyjnych niż ma to miejsce w przypadku układów elektrod bez płyty izolacyjnej ułożonej na elektrodzie uziemionej. Autorskie rozważania, bazujące na wykorzystaniu w pracach eksperymentalnych płyty izolacyjnej, która spowodowała ograniczenie występowania przebicia w badanym układzie, pozwoliły na wnioskowanie o propagacji wyładowań w cieczach w szerokim aspekcie krotności przepięć, które w warunkach typowych dla układu elektrod gołych skutkowałyby przebiciem. Podejście bazujące na odniesieniu napięć probierczych do krotności napięcia inicjacji było także oryginalnym podejściem autora do oceny porównawczej zachowania się poszczególnych cieczy dielektrycznych przy napięciu udarowym piorunowym. Zagadnieniem oryginalnym było także wykorzystanie w szacowaniu napięć inicjacji wyładowań elektrycznych w poszczególnych cieczach trójparametrycznego rozkładu Weibulla, który, za względu na trudności w jego aplikacji, jest pomijany na rzecz postaci dwuparametrycznej.

Wnioski z przeprowadzonych prac eksperymentalnych wskazały na istotne różnice w zachowaniu się płynów estrowych przy oddziaływaniu nań napięcia udarowego piorunowego w porównaniu do oleju mineralnego. Właściwości udarowe obu estrów okazały się gorsze zarówno przy dodatniej jak i ujemnej biegunowości napięcia udarowego, co zostało zaprezentowane we wskazanych pracach. Prace pozwoliły wskazać potencjalną przyczynę różnic pomiędzy estrami a olejem mineralnym oraz zaproponować sugestie dla projektantów transformatorów, którzy w swej pracy spotkają się z aplikacjami, gdzie jako medium izolacyjne będzie musiał być zastosowany któryś z estrów.

Całość prac badawczych, których wyniki zostały zawarte w artykułach stanowiących jednolity cykl publikacji były zaplanowane i prowadzone pod kierownictwem habilitanta, który w większości prac był samodzielnym autorem (10 z 14-tu publikacji), a w pozostałych 4-ech pierwszym, którego wkład procentowy w powstanie publikacji był nie mniejszy niż 70 %. Prace badawcze wykonywane były w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki przyznanego w konkursie SONATA i dodatkowo wspierane przez Dziekana Wydziału EEliA w ramach dotacji dla młodych naukowców przyznawanych na bazie otwartych konkursów. W okresie kończącym fazę badań, gdzie skupiono się głównie na analizie wyników oraz przygotowywaniu publikacji, habilitant uzyskał także wsparcie w postaci Stypendium Rektora PŁ, które znacząco przyczyniło się do uzyskanych osiągnięć publikacyjnych.

1. Rozga P.: The influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11. No. 3, 2011, pp. 720-727.

Autorski artykuł, który podsumowuje badania eksperymentalne prowadzone jeszcze w trakcie wykonywania pracy doktorskiej i w krótkim okresie po jej ukończeniu, stanowi punkt wyjścia i bazę wiedzy dla analizy wyników badań uzyskanych podczas eksperymentów dotyczących cieczy biodegradowalnych i oleju mineralnego w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta.

Najważniejszymi aspektami pracy odnoszącymi się do tematu "szczególnego osiągnięcia naukowego" jest porównawcza ocena zjawisk przedprzebiegowych zachodzących w oleju mineralnym w dwóch układach elektrod o quasi-nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego (układzie z izolowaną elektrodą WN i układzie z gołą elektrodą WN posiadającą wymiary zewnętrzne elektrody z izolacją). W obu przypadkach (podobnie jak w późniejszych badaniach na estrami) elektroda uziemiona pokryta była płytą izolacyjną z preszpanu. Ocena zjawisk przedprzebiegowych bazowała na porównaniu parametrów charakteryzujących strimery takich jak: kształt przestrzenny form wyładowczych rejestrowanych fotograficznie, przebiegi czasowe światła emitowanego przez wyładowanie oraz szybkość propagacji. Tak więc obserwacje pochodzące z zaaplikowania tych samych technik eksperymentalnych co w późniejszych badaniach estrów stanowiły podstawę wiedzy umożliwiającej interpretację wyników z układu modelowego ostrze-izolowana płyta o nierównomiernym rozkładzie natężenia pola elektrycznego.

Dwa główne aspekty, które szczególnie wzięto pod uwagę to:

- statystyczna ocena napięć inicjacji bazująca na trójparametrycznym rozkładzie Weibulla,
- wnioski płynące z interpretacji zarejestrowanych oscylogramów.

W pierwszym przypadku, po gruntownej analizie statystycznej bazującej na metodzie największej wiarygodności zaaplikowanej w programie Mostat, rozkład Weibulla w postaci trójparametrycznej (rzadko stosowany w analizie wyników badań wysokonapięciowych na rzecz postaci dwuparametrycznej) został uznany za najlepiej oddający charakter populacji udarowych napięć inicjacji w badanym układzie elektrod we wszystkich rozważanych przypadkach układów elektrod i obu biegunowościach udaru napięciowego piorunowego. Tak więc, mimo ograniczonej liczby elementów wektora zmiennej losowej reprezentującej pomierzone napięcia inicjacji, udowodniono możliwość użycia rozkładu Weibulla w postaci trójparametrycznej dla próbek o niewielkiej liczności. Taka konkluzja, w połączeniu z doniesieniami literaturowymi w tym zakresie, pozwoliła podjąć decyzję, co do użycia w przyszłych pracach badawczych rozkładu Weibulla

w postaci trójparametrycznej do analizy wyników pomiarów udarowych napięć inicjacji wyładowań elektrycznych w estrach oraz oleju mineralnym w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta.

Drugi z w/w aspektów, a więc wnioski płynące ze szczegółowej analizy porównawczej otrzymanych oscylogramów światła, pozwolił na wypracowanie podejścia do interpretacji przebiegów otrzymanych w badaniach estrów i oleju mineralnego w układzie o nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego. W głównej mierze rozeznanie czynnika wpływającego na różnicę w częstotliwości pojawiania się impulsów świetlnych na przebiegach światła miało tu znaczenie. Czynnikiem tym była podatność na kolejne skokowe wydłużenia kanałów wyładowczych (strimerów) w danych warunkach probierczych. Kiedy ładunek przestrzenny pochodzący z poprzedniego skokowego wydłużenia strimera w cieczy wpływa znacząco na proces ponownego zapłonu kanału wyładowczego (równoznacznego z procesami jonizacyjnymi wewnątrz niego i u jego czubka) to kolejne impulsy światła będą pojawiać się z niższą częstotliwością. Oczywiście dodatkowym aspektem, który rozważano przy interpretacji wyników pomiarów w omawianej pracy była też różnica pomiędzy elektrodami (gołą i izolowaną), jakkolwiek pewna główna idea tej interpretacji pomogła w ocenie późniejszych prac dotyczących estrów, badanych w układzie ostrze-izolowana płyta.

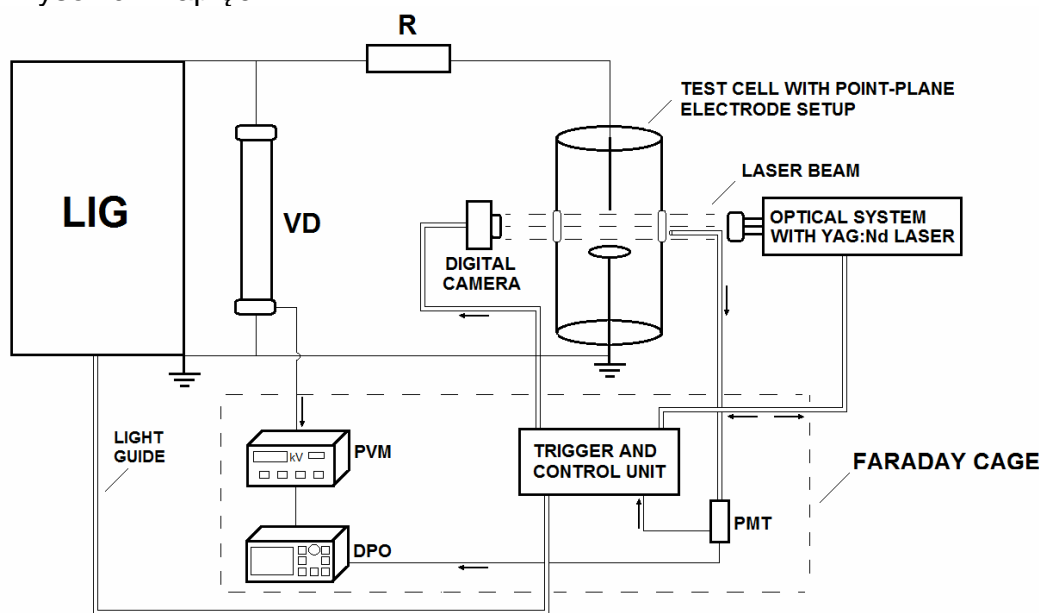
2. Rozga P., Cieslinski D., Stanek M., Kaczmarek M.: Measurement techniques used for study the electrical discharge mechanisms in Insulating ester fluids under lightning impulse, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, Vol. 14, No. 3, 2014, pp. 95-100.

Artykuł w sposób szczegółowy przedstawia techniki pomiarowe wykorzystane w tworzonym i modernizowanym przez habilitanta laboratorium do badania rozwoju wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych przy napięciu udarowym piorunowym. W niniejszym artykule, gdzie wkład autorski habilitanta wynosi 70%, przedstawiono opis poszczególnych technik, a także sposób automatycznego działania poszczególnych elementów składowych laboratorium. Habilitant opracował koncepcję artykułu, przygotował go, a także zaprojektował prace mające na celu weryfikację poprawnego działania układów eksperymentalnych zaaplikowanych w laboratorium. Współautorzy brali udział w wykonaniu pomiarów weryfikujących (D. Cieślinski i M. Stanek zrobili to w ramach swoich prac magisterskich), a dr inż. M. Kaczmarek w konsultacjach dotyczących zjawisk EMC. W artykule zwrócono uwagę na problemy, jakie należało uwzględnić podczas przygotowywania układu do pomiarów by móc uzyskać założony efekt końcowy. Głównym problemem była skuteczna eliminacja zakłóceń pochodzących od pracującego wysokonapięciowego generatora napięć udarowych piorunowych. Potwierdzeniem skuteczności przeprowadzonych działań były wyniki pierwszych testów, które krótko zostały skomentowane w artykule.

Ogólny schemat laboratorium badawczego przedstawiony został na rysunku 12, który pochodzi z omawianego artykułu.

Źródłem napięcia w przytoczonym układzie jest generator udarów napięciowych piorunowych Marxa (LIG) o parametrach: $U = 500 \text{ kV}$ i $E = 2,2 \text{ kJ}$. Generator wytwarza standaryzowany udar napięciowy piorunowy o parametrach charakterystycznych 1,2/50 μs , którego kształt został zweryfikowany zarówno w przypadku, gdy generator pracował w konfiguracji podstawowej jako 6-ściostopniowy oraz gdy konieczna była jego rekonfiguracja do postaci 2-stopniowej. Generator zasilany jest przez prostownik

wysokonapięciowy z transformatora probierczego o przekładni 220 / 110000 V. W zależności od wymaganej wartości napięcia wynikającej z przerwy elektrodowej generator może pracować w trybie pełnym (6-stopniowym) lub trybie niepełnym (2-stopniowym). Pomiar wartości szczytowej udaru dokonywany jest z użyciem rezystancyjnego dzielnika napięcia (VD), który z udziałem habilitanta został specjalnie zaprojektowany do niniejszego układu, a następnie wykonany w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki PŁ, oraz miernika wartości szczytowej (PVM). Dodatkowo przebieg fali napięciowej rejestrowany jest na jednym z kanałów oscyloskopu (DPO). Generator może pracować w trybie z wyzwaniem za pomocą układu trygatronowego lub trybie ręcznym. Udar napięciowy piorunowy doprowadzany jest przez rezystor ograniczający (R) do badanego układu elektrod ostrze-izolowana płyta zanurzonego w cieczy wypełniającej kadź probierczą, gdzie dochodzi do inicjacji i rozwoju wyładowania. Zarówno kadź probiercza jak i układ elektrod ostrze-izolowana płyta były autorskimi pomysłami habilitanta, które przygotowano w warsztacie mechanicznym Zakładu Wysokich Napięć.



Rys. 12. Schemat układu laboratoryjnego: LIG - generator udarów napięciowych piorunowych Marxa, VD - rezystancyjny dzielnik napięcia, R - rezystor ograniczający, PVM - miernik wartości szczytowej, DPO - oscyloskop cyfrowy, PMT - fotopowielacz.

Dwie główne techniki pomiarowe użyte w laboratorium to technika rejestracji fotograficznej wyładowań bazująca na metodzie cieniowej oraz technika fotopowielaczowej rejestracji światła emitowanego przez rozwijające się wyładowanie. Obie techniki w sposób szczegółowy zostały opisane w artykule wraz z prezentacją graficzną sposobu ich aplikacji w układzie (rysunki 3, 4 i 5 z publikacji). Użyte techniki pomiarowe są ze sobą powiązane z użyciem układu synchronizacji, rejestracji i pomiaru, którego głównym elementem jest jednostka sterująca zawierająca szereg przetworników optyczno-elektronicznych i elektroniczno-optycznych. Sposób pracy systemu synchronizacji, rejestracji i pomiaru, tj. sekwencja czasowego wyzwania poszczególnych komponentów układu, został także szczegółowo opisany w pracy z prezentacją graficzną kolejności zadziałania poszczególnych członów wykonawczych (rysunek 6 z publikacji).

W układzie rejestracji fotograficznej głównym elementem jest laser neodymowy z prętem YAG emitujący impuls o długości fali równej 1054 nm, który stanowi lampę

błyskową w układzie. W odpowiedniej chwili czasowej (mierzonej z tolerancją czasową $0,1 \mu\text{s}$) odniesionej do chwili doprowadzenia udaru do układu elektrod lub do chwili identyfikacji inicjacji wyładowania laser może być wyzwolony, co jest tożsame z wykonaniem fotografii. W układzie optycznym z kryształem KDP i polaryzatorem Wollastona z wiązki głównej wyselekcjonowana zostaje jej 2-ga harmoniczna tj. wiązka światła zielonego (532 nm), w świetle której wykonywane są fotografie cieniowe.

W układzie rejestracji światła najistotniejszym elementem jest natomiast fotopowielacz, który może rejestrować szybkie impulsy świetlne o krótkim czasie narastania (pojedyncze ns) i o niewielkiej intensywności, które emitowane są przez skokowo rozwijające się wyładowanie. użytym w układzie fotopowielaczem jest instrument o zakresie widmowym 300-850 nm, w którym to zakresie mieści się widmo wyładowań elektrycznych emitowane zarówno w fazie przedprzebiciowej jak i w czasie samego przebiccia. Światło na wejście fotopowielacza doprowadzane jest za pomocą światłowodu umieszczonego w bocznym okienku kadzi probierczej, zaś wyjściowy sygnał po wzmocnieniu rejestrowany jest w formie przebiegu czasowego na oscyloskopie.

Jak wspomniano rejestracja fotografii i oscylogramów następuje automatycznie, przy czym możliwe jest zdjęcie samego przebiegu czasowego światła z blokadą wykonywania fotografii. Taką opcję stosowano by przebieg światła nie był zakłócany impulsem laserowym, co miało miejsce podczas pomiarów, których wyniki przedstawiono w pracy 1.

Pierwsze wyniki badań eksperymentalnych zaprezentowane w artykule, w postaci przykładowych fotografii cieniowych wyładowań oraz przebiegów emitowanego światła (rysunki 8-13 z publikacji), potwierdziły możliwość wykonania, z wykorzystaniem zaaplikowanych w laboratorium badawczym technik pomiarowych, kompleksowych badań nad inicjacją i propagacją wyładowań elektrycznych w wybranych dielektrykach ciekłych w małych przerwach elektrodowych układu ostrze-izolowana płyta. Fotografie, niezależnie od biegunowości udaru, przy której zostały wykonane, charakteryzują się wysoką rozdzielczością i mnogością szczegółów, zaś oscylogramy wyraźnie wskazują na skokowy charakter propagacji wyładowań elektrycznych (strimerów), o czym świadczy sekwencja kolejnych impulsów rejestrowanych przez fotopowielacz, które następują po sobie z nanosekundowymi interwałami.

3. Rozga P., Stanek M., Cieslinski D.: Comparison of properties of electrical discharges developing in natural and synthetic ester at inception voltage, 2013 IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2013), Shenzhen, China, 20-23.10.2013, pp. 891-894

Artykuł konferencyjny zaprezentowany na jednej z najważniejszych konferencji branżowych (indeksowanej w bazie Web of Science) obejmującej swoją tematyką zagadnienia izolacji elektrycznej i zjawisk dielektrycznych organizowanych przez IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society stanowi pierwsze podejście do oceny porównawczej właściwości wyładowań elektrycznych rozwijających się w różnych cieczach dielektrycznych przy napięciu inicjacji. Zakres wkładu pracy habilitanta w artykuł wyniósł 80 %, na co złożyło się opracowanie procedury wyznaczania napięć inicjacji, wykonanie większości pomiarów, opracowanie statystyczne otrzymanych wyników i przygotowanie publikacji wraz z jej prezentacją na konferencji. Współautorzy zaś zrealizowali część pomiarów w ramach swoich prac magisterskich. W artykule, jako pierwszym z cyklu artykułów prezentujących wyniki badań eksperymentalnych, tabelarycznie zestawiono

pomierzone samodzielnie i przy współpracy z laboratorium chemicznym firmy ZREW-Transformatory S.A. parametry badanych cieczy dielektrycznych (tabela I z publikacji), które w dalszym etapie prac były testowane w szerokim zakresie napięć probierczych.

Ze względu na narzucone ograniczenie związane z objętością artykułu skupiono się w nim na następujących zagadnieniach:

- przedstawienie samodzielnie opracowanej procedury wyznaczania i następnie szacowania udarowego napięcia inicjacji wyładowań dla obu biegunowości udaru i czterech rozpatrywanych przerw elektrodowych układu ostrze-izolowana płyta (5, 10, 15 i 20 mm),
- liczbowego zestawienia wyników pomiarów będących rezultatem ich analizy statystycznej z wykorzystaniem trójparametrycznego rozkładu Weibulla (tabele II i III z publikacji),
- opracowania i zaprezentowania przykładowych krzywych dystrybuant napięć inicjacji dotyczących danej biegunowości udaru napięciowego piorunowego (rysunki 2 i 3 z publikacji),
- oszacowania, według przyjętej procedury, zbiorczej szybkości propagacji wyładowań jako wartości współczynnika kierunkowego prostej regresji w układzie $l = f(t)$ gdzie l jest długością najdłuższego kanału wyładowania mierzonego na podstawie fotografii, a t chwilą jej wykonania odniesioną do momentu inicjacji, a więc pozornym czasem propagacji wyładowania,
- dzięki zastosowaniu identycznej procedury wyznaczania napięcia inicjacji dla każdej z cieczy i każdej przerwy elektrodowej przedstawiono miarodajną zależność zmiany napięcia inicjacji od długości wolnej przerwy olejowej (rysunek 4 z publikacji).

Analiza wyników wykonanych pomiarów pozwoliła na sformułowanie pierwszych wniosków dotyczących rozwoju wyładowań elektrycznych w poszczególnych cieczach różniących się składem chemicznym przy doprowadzeniu do układu elektrod zanurzonego w tych cieczach udarowego napięcia inicjacji. Wnioski te były następujące:

- dla napięcia inicjacji i badanego układu elektrod ostrze-izolowana płyta o małych przerwach elektrodowych podobieństwo pomiędzy badanymi cieczami estrowymi a olejem mineralnym w zakresie rozwoju wyładowań elektrycznych jest duże, co można stwierdzić na podstawie podobieństwa w zakresie kształtu przestrzennego wyładowań ocenionego na podstawie zarejestrowanych fotografii cieniowych (przykład na rys. 4 z publikacji), przebiegów światła emitowanego przez wyładowanie (przykłady na rys. 5 z publikacji) jak i szybkości propagacji wyładowań dotyczących danej biegunowości napięcia. W tym ostatnim przypadku dla wszystkich cieczy zaobserwowano powszechnie znaną relację pomiędzy szybkościami dodatnich i ujemnych wyładowań wskazującą na znacznie wyższą prędkość tych pierwszych;
- wyniki w zakresie oszacowanych z pomiarów udarowych napięć inicjacji, zarówno jeśli porównamy mediany tych napięć jak i obliczone parametry przesunięcia rozkładu Weibulla, są także zbliżone.

Powyższe pierwsze spostrzeżenia stały się bazą do kolejnych etapów badań eksperymentalnych.

4. Rozga P., Stanek M.: Characteristics of streamers developing at inception voltage in small gaps of natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, IET Science, Measurement and Technology, Vol. 10, No. 1, 2016, pp. 50-57.

Artykuł przedstawia w formie rozszerzonej rozważania dotyczące zachowania się poszczególnych cieczy przy udarowym napięciu inicjacji, które w skróconej formie

zaprezentowano zostały w w/w artykule z konferencji CEIDP 2013. Zakres udziału habilitanta to 80 % zaś współautora 20 %.

W porównaniu do publikacji **3**, istotnym rozszerzeniem merytorycznej strony prezentowanych wyników pomiarów jest przede wszystkim wyraźnie wyartykułowana motywacja podjęcia studiów porównawczych zachowania się cieczy dielektrycznych przy narażeniach udarowych obu biegunowości. Wskazano, że obok korzystnych właściwości estrów w zakresie parametrów środowiskowych oraz w zakresie właściwości dielektrycznych związanych z napięciem przemiennym oraz przenikalnością dielektryczną, w literaturze można spotkać dane wskazujące, że przy napięciu udarowym piorunowym estry mają tendencję do bycia bardziej podatnymi na rozwój energetycznych wyładowań szybkich, co jest niepożądane z punktu widzenia praktycznych układów izolacji papierowo-olejowej. W związku z tym, że wyników badań w tym zakresie było niewiele i podkreślano wyraźnie potrzebę ich prowadzenia habilitant postanowił zająć się tym zagadnieniem rozpatrując problem w kategorii małych przerw elektrodowych i układu ostrze-izolowana płyta. W artykule skupiono się na dwóch przerwach tj. 15 i 20 mm jako bliższych praktycznym rozwiązaniom niż niewielkie przerwy rzędu 5 i 10 mm. Ważnym aspektem zawartym we wprowadzeniu do części pomiarowo-badawczej było udowodnienie ważności modelowania zjawisk wyładowczych w cieczach układem typu ostrze-izolowana płyta zamiast układem z gołą elektrodą uziemioną. Wyjaśniono więc, że użycie układów o polu skrajnie nierównomiernym daje pewność co do miejsca, gdzie wyładowanie zostanie zainicjowane - będzie to zawsze obszar w pobliżu elektrody ostrzowej. Jest to pozytywny fakt, także z punktu widzenia zaaplikowanych technik optycznych. Obserwowany przez urządzenie zbierające dane pomiarowe obszar może być ograniczony właśnie do obszaru wokół ostrza, gdzie zawsze następuje inicjacja. Kolejnym powodem jest to, że układ ostrze-płyta będący typowym układem o skrajnie nierównomiernym rozkładzie pola elektrycznego oraz małe przerwy elektrodowe nie wymagają szczególnie wysokich napięć inicjujących w przeciwieństwie np. do układów o polu równomiernym czy o dużych przerwach. Finalnie układy takie mogą, w pewnym zakresie, imitować defekty układu izolacyjnego, w którym istnienie mikroskopowych niejednorodności pola powodują lokalne zwiększenie naprężeń elektrycznych, gdy ma miejsce przepięcie i w takiej sytuacji może dojść do zainicjowania wyładowania.

Jeśli chodzi o zaprezentowane wyniki oraz wnioski z nich płynące to znacznie szerzej w porównaniu do pozycji **3** opisano spostrzeżenia dotyczące oszacowanych parametrów rozkładu Weibulla dla rozpatrywanych przypadków oraz wykreślonych na ich podstawie dystrybuant (rysunki 3 i 4 z publikacji). Wskazano w dyskusji na znacznie większe rozrzuty w przypadku przerwy 20 mm, co nie było faktem zaskakującym, oraz bardziej precyzyjnie omówiono wyniki związane z progową wartością napięcia inicjacji tj. parametrem przesunięcia V_0 , który oznacza wartość progową wytrzymałości badanego układu, poniżej której, w rozpatrywanym przypadku, inicjacja wyładowań w danej cieczy nie powinna zająć. Dla dodatknej biegunowości i właśnie 20 mm przerwy różnica pomiędzy estrem naturalnym a olejem mineralnym wyniosła dla parametru V_0 6,1 kV na korzyść estru, a porównując oba estry 2,2 kV na jego korzyść. Biorąc pod uwagę, że mediana napięć inicjacji wyniosła nieco poniżej 65 kV to w pierwszym przypadku różnica jest znacząca (ok. 10 %). Jakkolwiek wspomniane mediany praktycznie nie różniły się między sobą rozpatrując daną przerwę i daną biegunowość napięcia.

Rozszerzona interpretacja wyników zawarta w omawianej pozycji dotyczyła także obliczonych dla każdego z przypadków natężenia pola elektrycznego inicjacji (tabela 4 z publikacji) ze wzoru (1) zamieszczonego w części wprowadzającej. W tym zakresie uzyskano wartość bliską 0,9 MV/cm, co jest natężeniem pola elektrycznego zawierającym się w zakresie wartości literaturowych mówiących o natężeniu pola, przy którym w cieczy

dielektrycznej mogą zostać zainicjowane strimery. Tym samym wykonane pomiary i obliczenia wskazały, że inicjacja wyładowań elektrycznych w danej cieczy nie zależy od tego, jaką ciecz rozpatrujemy. Można zatem przypuszczać, że tzw. pęcherzykowy mechanizm inicjacji w taki sam sposób odpowiada za inicjację we wszystkich badanych dielektrykach ciekłych.

Prezentacja wyników w znacznie szerszym stopniu dotyczyła także otrzymanych podczas pomiarów fotografii cieniowych i oscylogramów światła. Pokazano reprezentatywne przykłady dla każdego przypadku cieczy i obu biegunowości. W zakresie kształtu podkreślono brak różnic pomiędzy fotografiami dotyczącymi poszczególnych cieczy natomiast w zakresie przebiegów światła wskazano na zauważalną niższą częstotliwość impulsów światła w przypadku propagacji wyładowań w oleju mineralnym przy zachowaniu jednak we wszystkich przypadkach zaniku wyładowań po osiągnięciu przez nie pewnej odległości od elektrody inicjującej. Takie wyładowania, w literaturze nazwane "stopping length streamers", rozwijały się przy napięciu inicjacji we wszystkich cieczach tak samo, aż do osiągnięcia odległości, w której natężenie pola elektrycznego wynikające z geometrii elektrod i przyłożonego napięcia było zbyt niskie, aby podtrzymać procesy jonizacyjne.

W przypadku szybkości propagacji przedstawione zostały także przykłady prostych regresji wyznaczonych dla wybranych przypadków dotyczących przerwy 15 mm pokazujące ogólny sposób postępowania przyjęty do wyznaczania tych szybkości.

Ogólne wnioski z zaprezentowanych w pracy wyników badań eksperymentalnych wskazały na duże podobieństwo w rozwoju wyładowań elektrycznych w badanych cieczach przy napięciu inicjacji. Z kolei biorąc pod uwagę zbliżone wartości napięć inicjacji wyniki można interpretować jako zbliżoną wytrzymałość elektryczną cieczy estrowych i oleju mineralnego. Jakkolwiek wyraźnie zaznaczono, że prace eksperymentalne dla napięć wyższych niż napięcie inicjacji mogą przynieść znacznie szerszy obraz zachowania estrów przy napięciu udarowym piorunowym.

5. Różga P.: Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 1'2014, s. 245-247

Autorska publikacja prezentuje w zwartej formie wyniki badań własnych oraz dane literaturowe na temat wytrzymałości elektrycznej estrów biodegradowalnych przy napięciu przemennym oraz udarowym piorunowym. W części wprowadzającej opisano zalety estrów w zakresie właściwości przyjaznych środowisku (biodegradowalność i temperatura zapłonu), a następnie unormowania, które określają wymagania stawiane tym płynom jako cieczom izolacyjnym. W tym miejscu należy zaznaczyć, że informacja odnośnie normy europejskiej dotycząca estrów naturalnych została potwierdzona opublikowaniem stosownej normy o indeksie IEC 62770 w 2014 roku.

W dalszej części pracy omówiono wyniki badań własnych potwierdzających podobną wytrzymałość elektryczną przy napięciu przemennym poszczególnych cieczy oraz omówiono wpływ zawilgocenia na tę wytrzymałość przytaczając odpowiednią wizualizację graficzną zależności napięcia przemennego przebiecia od zawilgocenia pochodzącą z literatury (rysunek 1 z publikacji). Z kolei w zakresie wytrzymałości udarowej przytoczono wyniki szacowania udarowych napięć inicjacji wskazując także na podobieństwo w ich wartościach. Jakkolwiek wyraźnie zaznaczono, bazując na doniesieniach literaturowych, że wyższe krotności napięć probierczych odniesione do napięcia inicjacji wskazują na gorsze właściwości estrów przy napięciu udarowym. Studia

literaturowe w tym zakresie zwracają szczególną uwagę na intensyfikację zjawiska negatywnego zachowania się estrów przy napięciu udarowym dla dłuższych przerw elektrodowych układu ostrze-płyta tj. przerw rzędu 8-10 cm.

6. Rozga P.: Positive streamer propagation in small gap of synthetic ester under lightning impulse, 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL 2014), Bled, Slovenia, 30.06-03.07.2014, pp. 1-4

Artykuł konferencyjny o tytule jak powyżej zaprezentowany podczas sztanarowej konferencji IEEE dotyczącej dielektryków ciekłych (indeksowanej w bazie Web of Science) był pierwszym podejściem do prezentacji wyników porównawczych pochodzących z własnych badań eksperymentalnych dotyczących propagacji wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym i oleju mineralnym przy napięciu udarowym piorunowym. Ze względu na konieczność ograniczenia objętości artykułu do 4 stron, w artykule skupiono się na udarze biegunowości dodatniej i przerwie 20 mm. Wyniki przedstawiono dla całości założonego zakresu napięć probierczych tj. od napięcia inicjacji V_i do napięcia probierczego będącego krotnością napięcia inicjacji równą $2,4 V_i$. Takie podejście umożliwia ocenę podatności danego płynu dielektrycznego na przepięcia natury udarowej mogące pojawić się w układach izolacyjnych wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.

Całość przedstawionych rozważań najlepiej obrazuje zależność szybkości propagacji dodatnich strimerów w danej cieczy od napięcia probierczego wyrażonego krotnością napięcia inicjacji (rysunek 7 z publikacji). Z zależności tej wyraźnie można wywnioskować, że w estrze syntetycznym strimery dodatnie o szybkości propagacji przekraczającej 10 km/s pojawiają się przy znacznie niższym napięciu probierczym niż ma to miejsce w przypadku badanego oleju mineralnego. To spostrzeżenie jest niezwykle ważne z praktycznego punktu widzenia. Jeśli w transformatorze, gdzie izolacją ciekłą będzie ester syntetyczny pojawi się przepięcie i zainicjowane zostanie wyładowanie, to przy niższej wartości tego przepięcia możliwy jest rozwój szybkich wyładowań dodatnich 3-go rzędu o znacznie większej energii niż wyładowania powolne, które przy tym samym napięciu rozwijałyby się w układzie z izolacją ciekłą w postaci oleju mineralnego. Bardziej energetyczne (emitujące więcej światła) wyładowania szybkie, rozwijające się na skutek tzw. mechanizmu jonizacji w fazie ciekłej, mogą wskutek swej propagacji doprowadzić do uszkodzenia elementów izolacji stałej (papier transformatorowy, preszpan), a więc większe prawdopodobieństwo takiego uszkodzenia dotyczyć może izolacji z estrem syntetycznym właśnie. Mimo więc, że niewiele wyższe napięcia inicjacji dla przerwy 20 mm i dodatniej biegunowości udaru napięciowego piorunowego posiada ester syntetyczny (mowa tu o parametrze przesunięcia V_0 rozkładu Weibulla), to jednak przy wyższej krotności napięcia inicjacji zdecydowanie korzystniejsze właściwości w zakresie wytrzymałości udarowej posiada olej mineralny.

7. Różga P.: Rozwój wyładowań elektrycznych w estrze syntetycznym przy napięciu udarowym piorunowym, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2'2015, s. 14-17.

Rozszerzona w stosunku o publikacji 6 ocena porównawcza zachowania się estru syntetycznego i oleju mineralnego przy napięciu udarowym piorunowym o wartości szczytowej zmieniającej się od napięcia inicjacji do krotności tego napięcia rzędu 2,4 została przedstawiona w niniejszym artykule na tle krótkiej charakterystyki teorii propagacji

wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych. Rozważanymi przerwami, dla których przedstawiono wyniki były przerwy 15 i 20 mm. Otrzymane wyniki pokazały, że oba użyte płyny izolacyjne zachowują się odmiennie przy wzroście udarowego napięcia probierczego, mimo że statystycznie oszacowane napięcia inicjacji wyładowań można uznać za niemal identyczne. W estrze syntetycznym dla obu testowanych przerw elektrodowych i dodatniej biegunowości udaru zaobserwowano pojawienie się wyładowań szybkich (3-go rzędu) przy napięciu probierczym znacznie niższym niż ma to miejsce w oleju mineralnym. Napięcie odpowiadające krotności $1,8 U_i$ stanowiło napięcie przyspieszenia wyładowań w estrze, podczas gdy w oleju mineralnym ta krotność wyniosła $2.2 U_i$. W przypadku biegunowości ujemnej udaru zmiana sposobu rozwoju wyładowań miała miejsce tylko w przypadku estru przy krotności równej $2,0 U_i$. W oleju mineralnym przy ujemnym udarze szybkie wyładowania nie pojawiły się w ogóle w zakresie zastosowanego napięcia probierczego. Wnioskiem głównym sformułowanym na podstawie przeprowadzonych badań był wniosek niemal powtórzony z publikacji **6**, że ester syntetyczny wykazuje mniejszą zdolność do ochrony przed pojawieniem się szybkich wyładowań elektrycznych rozwijających się na skutek jonizacji w fazie ciekłej. Ponieważ szybkie wyładowania są bardziej energetyczne i niebezpieczne dla izolacji stałej transformatora, wydaje się, że ograniczanie przepięć mogących spowodować pojawienie się tego typu wyładowań, w przypadku transformatora z izolacją ciekłą w postaci estru syntetycznego staje się szczególnie istotnym aspektem przy projektowaniu takich transformatorów. Eliminacja potencjalnego powodu pojawienia się wyładowań 3-go lub 4-go rzędu powodującego zniszczenie izolacji papierowej w przypadku zainicjowania wyładowania elektrycznego podczas przepięcia można postawić za główny cel w ochronie przeciwprzepięciowej transformatorów z estrami. Wyniki zaprezentowane w artykule bazowały na szacowaniu zmiany sposobu propagacji na podstawie szybkości wyładowań elektrycznych ocenianej poprzez analizę prostych regresji odpowiadających danemu przypadkowi i oscylogramów światła. Jakkolwiek szczegóły dotyczące interpretacji oscylogramów zostały pominięte ze względu na konieczność przygotowania artykułu o objętości 4 stron.

8. Rozga P.: Streamer propagation in small gaps of synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22. No. 5, 2015, pp. 2754-2762.

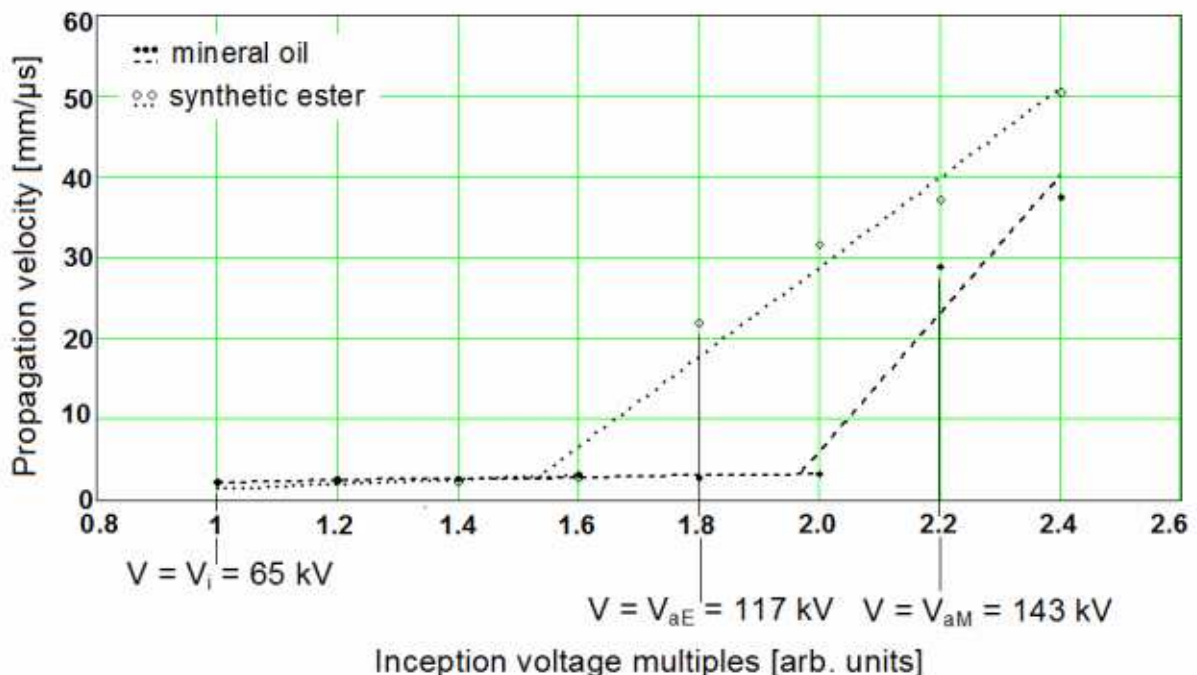
Bardziej kompleksowa ocena porównawcza izolacyjnego estru syntetycznego z olejem mineralnym w przeciwieństwie do ograniczonej objętości pozycji **6** i **7** zawarta została natomiast w niniejszej, w pełni autorskiej publikacji. Artykuł zawiera szeroko omówione wyniki badań eksperymentalnych dotyczących dwóch przerw elektrodowych (15 i 20 mm) układu ostrze-izolowana płyta z podziałem na biegunowości udaru napięciowego piorunowego. W pracy krytycznie skomentowano dla poszczególnych przypadków zależności szybkości propagacji strimerów od napięcia probierczego wyrażonego krotnością napięcia inicjacji, a także kształty fotograficznie zarejestrowanych form wyładowczych i oscylogramów emitowanego przez wyładowania światła. W części wprowadzającej do prezentacji wyników dokładnie scharakteryzowano:

- układ eksperymentalny wykorzystany w badaniach,
- autorsko opracowaną procedurę pomiarową bazującą na gromadzeniu danych przy kolejnych poziomach napięcia probierczego stanowiącego krotność statystycznie wyznaczonego napięcia inicjacji, przy czym krok napięciowy ustalono na $0,2 V_i$, a maksymalną krotność na $2,4 V_i$,

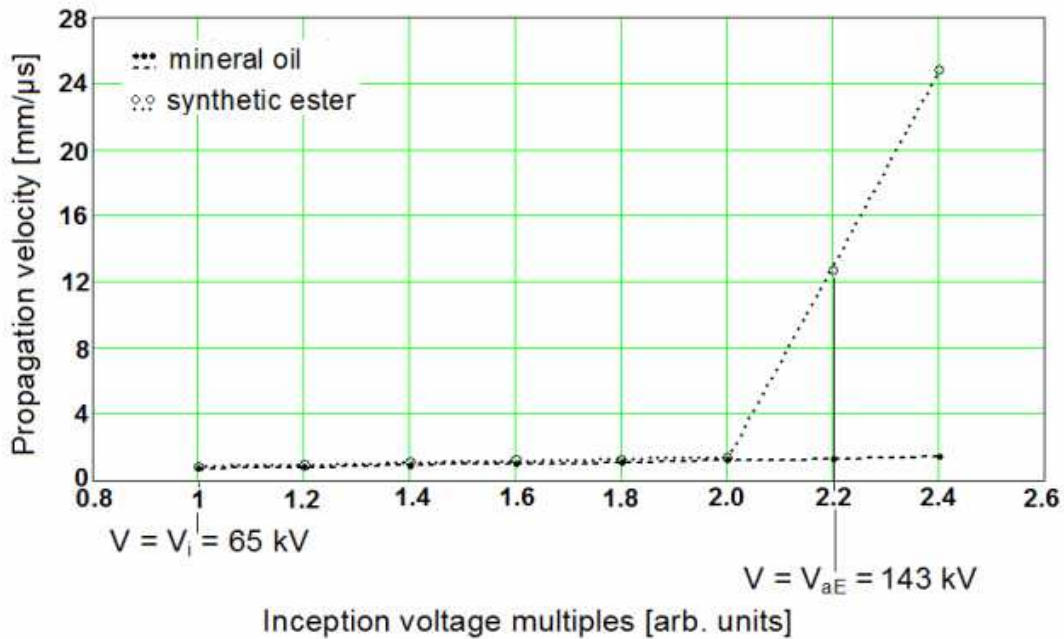
- sposób szacowania szybkości propagacji, która znacząco różniła się dla przypadku strimerów typu "stopping length" i strimerów osiagających płytę izolacyjną ułożoną na elektrodzie uziemionej.

Ponieważ artykuł stanowił kompleksową ocenę zachowania się obu cieczy przy narażeniach natury udarowej, to na wniosek recenzentów przypomniano w nim także krótko charakterystykę sposobu szacowania napięcia inicjacji wraz ze stosownymi krzywymi przedstawiającymi dystrybuanty rozkładu Weibulla dla wybranych przypadków (rysunki 3a i 3b z publikacji).

Przyjętym podejściem w prezentacji wyników badań, prowadzącym do konkluzji na temat różnic i podobieństw w propagacji wyładowań elektrycznych w obu cieczach, było podejście bazujące na rozeznaniu rodzaju propagacji (propagation mode), jaka ma miejsce na danym poziomie napięciowym z podziałem na biegunowość dodatnią i ujemną. To rozeznanie było możliwe do wykonania na podstawie zarejestrowanych przebiegów światła jak i fotografii wyładowań. Obie te techniki pozwoliły na zbiorcze przedstawienie wyników jako, wspomnianej przy okazji publikacji **6** i **7**, zależności szybkości propagacji strimerów od krotności napięcia inicjacji. W artykule jednak, obok samych przykładowych wykresów reprezentujących przypadek 20 mm przerwy elektrodowej i obu biegunowości udaru napięciowego piorunowego (rysunki 10 i 16 z publikacji), przytoczono także stosowne tabele (tabele 5 i 6 z publikacji), gdzie podano dokładne wartości oszacowanych szybkości dla obu rozważanych przerw i obu biegunowości udaru. Ponieważ wzmiankowane zależności stanowiły istotę porównawczej analizy badanych cieczy przytoczono je także poniżej jako rysunki 13 i 14.



Rys. 13. Zależność szybkości propagacji dodatnich wyładowań elektrycznych od napięcia probierczego wyrażonego krotnością napięcia inicjacji V_i dla 20 mm przerwy: V_i - napięcie inicjacji, V_{aE} - napięcie przyspieszenia dla estru syntetycznego, V_{aM} - napięcie przyspieszenia dla oleju mineralnego.



Rys. 14. Zależność szybkości propagacji ujemnych wyładowań elektrycznych od napięcia probierczego wyrażonego krotnością napięcia inicjacji V_i dla 20 mm przerwy:

V_i - napięcie inicjacji,

V_{aE} - napięcie przyspieszenia dla estru syntetycznego.

Ważnym aspektem oceny właściwości wyładowań w obu badanych cieczach była analiza zarejestrowanych oscylogramów światła. Dla każdej z biegunowości udaru podano 3 pary reprezentatywnych oscylogramów dotyczących charakterystycznych zjawisk możliwych do identyfikacji wraz ze szczegółową ich interpretacją. W odróżnieniu od publikacji 6, tu oscylogramy pokazano w formie powiększonych fragmentów tej ich części, która była najistotniejsza z punktu widzenia procesów propagacji wyładowań. Trzy najistotniejsze fazy zostały wyróżnione dla obu biegunowości:

- faza propagacji strimerów zanikających w przestrzeni elektrodowej przed dotarciem do płyty izolacyjnej (wspomniane już "stopping length streamers"),
- faza propagacja strimerów powolnych (o szybkościach < 10 km/s) docierających do płyty izolacyjnej z generacją wyładowań ślizgowych i kanału powrotnego,
- faza propagacja wyładowań szybkich (o szybkości > 10 km/s) docierających do płyty izolacyjnej z generacją zjawisk jak wyżej.

Wyniki badań przedstawione w artykule jednoznacznie wskazały, że przy narażeniach udarowych zarówno biegunowości dodatniej jak i ujemnej ester syntetyczny wykazuje mniejszą odporność na udary charakteryzowaną niższym napięciem probierczym (wyrażonym krotnością napięcia inicjacji), przy którym pojawiają się szybkie wyładowania elektryczne propagujące jako rezultat tzw. jonizacji w fazie ciekłej. W przypadku biegunowości dodatniej tak samo dla obu przerw elektrodowych w estrze syntetycznym wyładowania szybkie pojawiły się przy krotności równej 1,8 napięcia inicjacji V_i (uznanej jako wartość napięcia przyspieszenia dodatnich strimerów w estrze syntetycznym w anych warunkach pomiarowych), podczas gdy w oleju mineralnym przy krotności 2,2 V_i (napięcie przyspieszenia strimerów dodatnich w oleju mineralnym). W wartościach rzeczywistych napięcia udarowego (jego wartości szczytowej) ta różnica wyniosła odpowiednio 24 i 26 kV dla 15 i 20 mm przerwy. Jeśli chodzi o biegunowość ujemną to dla obu przerw tylko w estrze syntetycznym zaobserwowano wyładowania

szybkie, które pojawiły się przy krotności 2,2 V_i . W oleju mineralnym zaś do założonej krotności 2,4 V_i wyładowań szybkich nie zarejestrowano. Jako prawdopodobną przyczynę tej sytuacji wskazano różnicę w strukturze chemicznej obu cieczy - jakkolwiek jednoznaczna przyczyna była trudna do określenia na tym etapie badań.

Z praktycznego punktu widzenia przytoczono sformułowany wniosek o konieczności uwzględnienia faktu gorszych właściwości estrów syntetycznych przy narażeniach natury udarowej w procesie koordynacji izolacji transformatorów z izolacją estrową, aby zmniejszyć możliwość pojawienia się przepięć mogących przyczynić się do zainicjowania w estrze wyładowań typu szybkiego (wyładowań 3-go rodzaju).

9. Rozga P., Stanek M.: Positive streamer propagation in natural ester and mineral oil under lightning impulse, International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2015), Pilzno, Czechy, 23-28.08.2015, Paper 73.

Niniejsza publikacja jest natomiast pierwszym podejściem do przedstawienia charakteru wyładowań elektrycznych rozwijających się w estrze naturalnym przy wyższych wartościach napięcia probierczego niż napięcie inicjacji i porównanie otrzymanych wyników z wynikami dotyczącymi wyładowań rozwijających się w oleju mineralnym w analogicznych warunkach probierczych. Praca powstała z 80%-owym wykładem habilitanta i 20%-owym współautora. Habilitant był odpowiedzialny za koncepcję prac, plan i przygotowanie aparatury, nadzorowanie i wykonywanie pomiarów, a także współpracowanie wyników i przygotowanie publikacji do druku. Mgr M. Stanek (już jako doktorant w Instytucie Elektroenergetyki) wykonywał pomiary i częściowo opracował ich wyniki.

W publikacji skupiono się głównie na przerwie 20 mm jako dającej najwięcej danych do analizy i rozważono dodatni udar napięciowy piorunowy. Dodatkowo krótko skomentowano obserwacje dotyczące bardzo małej, 5 mm przerwy elektrodowej. Podobnie jak dla przypadku estru syntetycznego zaprezentowano jako wynik pomiarów porównawczą zależność szybkości propagacji wyładowań w badanych cieczach od napięcia probierczego wyrażonego krotnością napięcia inicjacji (rysunek 1 z publikacji). Kolejne fazy rozwoju wyładowań skomentowane zostały na bazie zaprezentowanych oscylogramów światła (rysunki 3-5 z publikacji), na których zwrócono uwagę na różnice w częstotliwości impulsów światła stanowiących różnicę pomiędzy badanym estrem naturalnym a olejem mineralnym. Wyjaśniono przejście wyładowań od wyładowań powolnych typu "stopping length" przez wyładowania powolne docierające do płyty izolacyjnej umieszczonej na elektrodzie uziemionej, kończąc na wyładowaniach szybkich, wskazując, że poszczególne rodzaje wyładowań pojawiają się wraz ze wzrostem krotności napięcia inicjacji. Wnioski z przeprowadzonych badań, podobnie jak w przypadku estru syntetycznego, wskazały jednoznacznie, że olej mineralny zachowuje się lepiej niż badany ester naturalny przy narażeniach udarowych. Wzmocnienie takiego wniosku uzyskano z obserwacji zjawisk, które towarzyszą wyładowaniom rozwijającym się w przerwie 5 mm, gdzie przebicie w estrze naturalnym miało miejsce przy niższej krotności napięcia inicjacji. Gdy natomiast na tym samym poziomie napięcia dochodziło do przebicia zarówno w oleju mineralnym jak i estrze naturalnym, intensywność światła generowanego przez przebicie w estrze była znacząco większa.

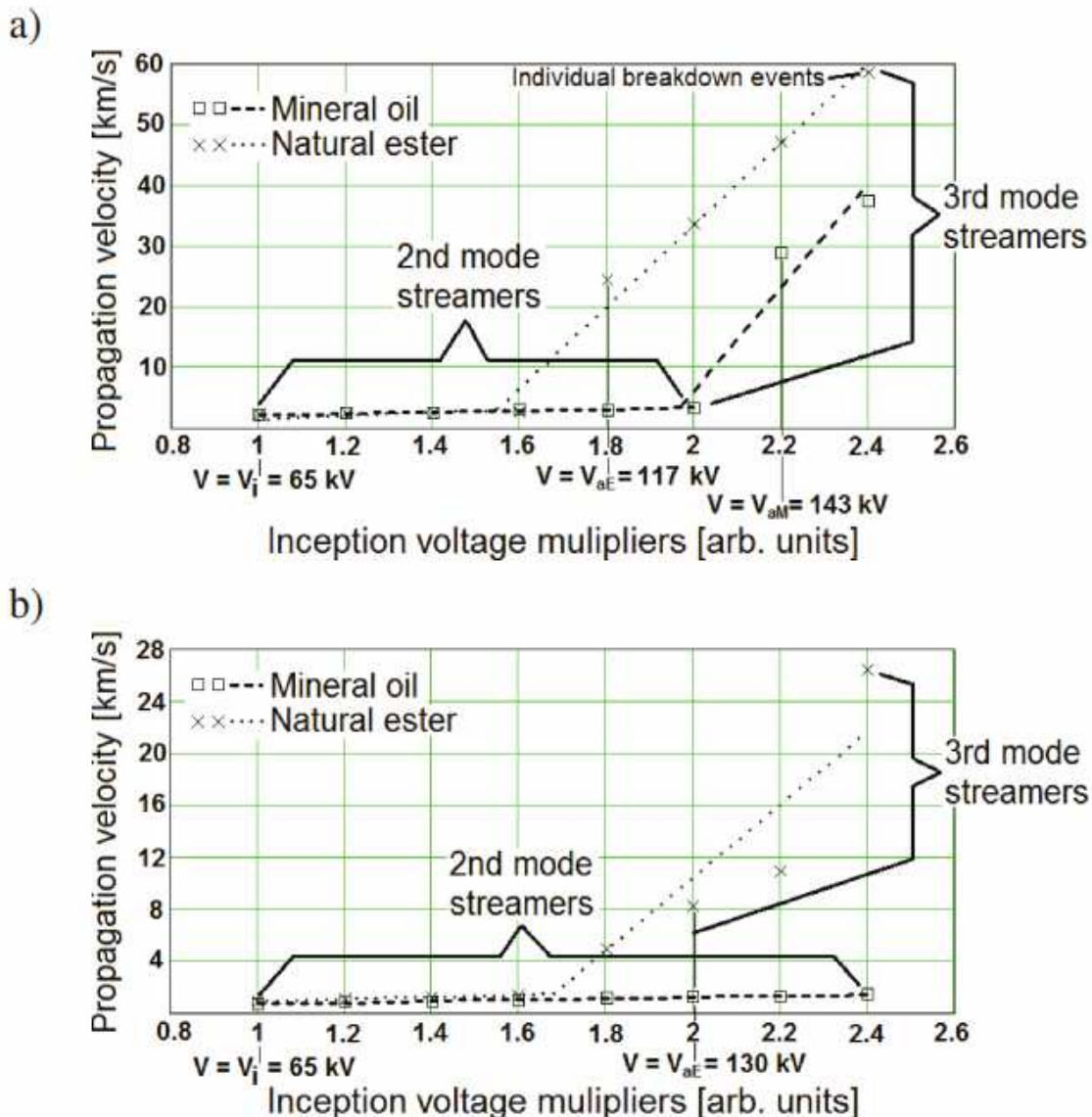
10. Rozga P.: Streamer propagation in a non-uniform electric field under lightning impulse in short gaps insulated with natural ester and mineral oil, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 64, No. 1, 2016, pp. 171-179.

Niniejszy artykuł stanowi kompleksową ocenę porównawczą estru naturalnego z olejem mineralnym w zakresie zachowania się obu płynów izolacyjnych przy udarach napięciowych piorunowych obu biegunowości dla szerokiego spektrum zastosowanych napięć probierczych i dwóch przerw elektrodowych układu ostrze-izolowana płyta: 15 i 20 mm. W kolejnych rozdziałach przedstawione zostały obszernie następujące zagadnienia:

- założenia pracy tj. źródło, u którego podstaw leżało zainteresowanie podjętym tematem;
- użyte techniki eksperymentalne tj. metoda rejestracji fotograficznej wyładowań oraz metoda rejestracji światła emitowanego przez wyładowanie z użyciem techniki fotopowielaczowej wraz z opisem laboratorium badawczego;
- wyniki badań z podziałem na napięcie inicjacji oraz zaobserwowane rodzaje wyładowań (tzw. "propagation modes");
- spostrzeżenia i wnioski krytycznie oceniające otrzymane wyniki.

Podobnie jak w przypadku porównania oleju mineralnego i estru syntetycznego (jak w pracy 8) głównym, podsumowującym fragmentem pracy było przedstawienie, dla każdej z biegunowości udaru, zależności zmian szybkości propagacji wyładowań od przyłożonego napięcia (rysunki 5a i 5b oraz tabele 6 i 7 z publikacji). Zależność ta umożliwiła wskazanie jednoznacznej różnicy pomiędzy badanymi cieczami poprzez identyfikację wartości napięcia, dla którego pojawiły się wyładowania szybkie w danej cieczy, a więc wartości napięcia przyspieszenia. Jako najważniejszy aspekt natury porównawczej przytoczono także w tej publikacji odpowiednie wykresy dotyczące 20 mm przerwy, które przytoczono również poniżej.

Podobnie jak to miało miejsce w przypadku estru syntetycznego, w estrze naturalnym napięcie przyspieszenia zostało zidentyfikowane jako znacznie niższe niż napięcie przyspieszenia odpowiadające wyładowaniom w oleju mineralnym. Dla dodatniej biegunowości udaru w wartościach krotności napięcia inicjacji uzyskano tę samą różnicę jak w przypadku estru syntetycznego ($1,8 V_i$ dla estru naturalnego do $2,2 V_i$ dla oleju mineralnego). W przypadku ujemnej biegunowości w estrze naturalnym wyładowania szybkie pojawiły się przy krotności $2,0 V_i$, podczas gdy w oleju mineralnym nie zaobserwowano przyspieszenia. Ocena porównawcza zachowania obu cieczy została wykonana także na bazie porównania obrazów wyładowań rejestrowanych fotograficznie i oscylogramów emitowanego przez wyładowania światła. W pierwszym przypadku różnic nie zaobserwowano podobnie jak przy porównaniu estru syntetycznego z olejem mineralnym. W drugim zaś wyraźnie zauważalna była różnica w intensywności emitowanego światła, która to intensywność większa była w przypadku estru naturalnego. Impulsy światła rejestrowane dla wyładowań rozwijających się w estrze naturalnym podobnie jak w przypadku estru syntetycznego posiadały wyższą częstotliwość i większe wartości szczytowe dla danego poziomu napięcia niż impulsy zarejestrowane dla wyładowań w oleju mineralnym. Świadczyć to może więc o łatwiejszych warunkach do kolejnych skokowych wydłużeń kanałów wyładowczych. Sformułowany wniosek końcowy jest więc identyczny z wnioskiem, który został zapisany w przypadku prac poświęconych estrowi syntetycznemu. Ester naturalny jest także bardziej podatny na pojawienie się wyładowań szybkich niż olej mineralny co, z praktycznego punktu widzenia, należy uwzględnić w procesie koordynacji izolacji układu izolacyjnego z estrem naturalnym jako cieczą dielektryczną.



Rys. 15. Zależność szybkości propagacji wyładowań elektrycznych od napięcia probierczego wyrażonego krotnością napięcia inicjacji V_i dla 20 mm przerwy i biegunowości dodatniej (a) oraz ujemnej (b):

V_i - napięcie inicjacji,

V_{aE} - napięcie przyspieszenia dla estru naturalnego,

V_{aM} - napięcie przyspieszenia dla oleju mineralnego.

11. Różga P.: "Wyładowania elektryczne w dielektrykach ciekłych w polu nierównomiernym przy napięciu udarowym piorunowym - mechanizm i metody badawcze", Rozdz. w monografii X Forum "Transformatory Energetyczne", s. 117-164, 2015, ISBN: 978-83-940283-1-2.

Na 48 stronach niniejszej publikacji zebrana została w formie zwartej obecna wiedza z zakresu teorii inicjacji i propagacji wyładowań elektrycznych w dielektrykach ciekłych w polu nierównomiernym wraz z metodologią badawczą aplikowaną w pracach eksperymentalnych dotyczących mechanizmów wyładowań elektrycznych oraz wytrzymałości elektrycznej cieczy przy napięciu udarowym. Dodatkowo w zwartej formie przedstawione zostały wyniki badań porównawczych, zarówno pochodzących z literatury jak i autorskich, dotyczących wytrzymałości udarowej estrów i oleju mineralnego oraz

propagacji wyładowań elektrycznych w tych cieczach przy napięciu udarowym piorunowym.

W rozważaniach zamieszczonych w pierwszej części publikacji scharakteryzowane zostały ciecze dielektryczne stosowane w transformatorach energetycznych. Przedstawiono ogólnie budowę chemiczną każdej z nich, a tabelarycznie zestawiono podstawowe parametry fizyko-chemiczne i dielektryczne. Dla każdej z cieczy estrowych pokazano także rozwój aplikacji z ich udziałem w formie "osi czasu", na którą naniesiono kolejne charakterystyczne i ważne momenty związane z ich rozwojem (rysunki 1 i 2 z publikacji zamieszczone w podrozdziale 2).

Druga część pracy dotyczyła oceny literaturowych doniesień opisujących mechanizm wyładowań elektrycznych w cieczach dielektrycznych. W publikacji podjęto próbę zebrania szerokiego spektrum danych literaturowych w zwartą formę opisującą najważniejsze aspekty determinujące inicjację (podrozdział 4.2) oraz propagację wyładowań elektrycznych (podrozdział 4.3) w cieczach. Całość poprzedzono definicją strimera, jako pojęcia powszechnie stosowanego do opisu zjawisk zachodzących w cieczach, jednak znacząco różniącą się od definicji tego pojęcia w odniesieniu do wyładowań w gazach (podrozdział 4.1). Obszerna część materiału teoretycznego zaprezentowanego w omawianej publikacji została przytoczona w części wprowadzającej do opisu poszczególnych osiągnięć naukowych niniejszego wniosku. Za najistotniejsze osiągnięcie należy uznać w opracowanej części teoretycznej zestawienie tabelaryczne charakterystyk dwóch podstawowych typów wyładowań elektrycznych w cieczach, a mianowicie powolnych wyładowań 2-go rodzaju oraz szybkich wyładowań 3-go rodzaju (tabela 4 z publikacji) umożliwiające rozróżnienie obu typów wyładowań od siebie. Jednocześnie na bazie danych literaturowych zestawiono sekwencję kolejnych możliwych do zaobserwowania zjawisk w układzie ostrze-płyta wraz ze zwiększającym się napięciem probierczym (tabela 5 z publikacji). Jako podsumowanie tej części zestawiono na bazie własnych doświadczeń, po raz pierwszy w takiej formie, autorskie podejście prezentujące sekwencję zdarzeń dla układu ostrze-izolowana płyta (tabela 6 z publikacji) jako bardziej praktycznego układu z punktu widzenia zjawisk wyładowczych możliwych do pojawienia się w rzeczywistych układach izolacyjnych typu transformatorowego, gdzie z miejsca (mikroostrza) wprowadzającego niejednorodność rozkładu natężenia pola elektrycznego rozwinąć się może wyładowanie do elementów pokrytych izolacją. Powyżej wzmiankowaną tabelę przytoczono także poniżej (tabela 6). Podział na wyładowania powolne i szybkie został również krytycznie skomentowany w zakresie teorii propagacji wyładowań w cieczach dielektrycznych.

Kolejna część pracy to podsumowanie wyników prac badawczych nad estrami opublikowanych przez grupę badaczy z University of Manchester, gdzie kompleksowo, w sposób porównawczy, oceniono zachowanie estrów w odniesieniu do oleju mineralnego podczas badań w układzie gołych elektrod ostrze-płyta przy udarze napięciowym piorunowym. Odnosząc się do tych wyników zestawiono także zbiorczo wyniki prac autorskich habilitanta dotyczących obu estrów i oleju mineralnego naprężanych także udarem znormalizowanych z tym, że w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta. W przypadku badań własnych skomentowane zostały wyniki dotyczące zależności szybkości propagacji od napięcia probierczego dla obu estrów i oleju mineralnego (zbiorczo wyniki z publikacji **8** i **10**) oraz podobieństwa i różnice w zarejestrowanych fotografiach cieniowych wyładowań i przebiegach emitowanego przez wyładowania światła. Zestawienie wyników badań własnych z wynikami badań z University of Manchester potwierdziły, że autorskie zależności są znacząco podobne do ogólnych zależności pomiędzy badanymi cieczami przedstawionymi w pracach wiodącego ośrodka międzynarodowego. Praca podsumowała więc wcześniej wypracowane wnioski, że oba

estry (w badaniach własnych i University of Manchester użyto tego samego estru syntetycznego i tego samego estru naturalnego) wykazują gorsze właściwości niż olej mineralny przy narażeniach udarem napięciowym piorunowym, niezależnie od biegunowości tego udaru.

Tabela 6. Sekwencja zdarzeń wyładowczych w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta przy napięciu udarowym następujących wraz ze zwiększającym się napięciem probierczym

Lp.	Rodzaj zjawiska	Względna wartość napięcia odniesiona do napięcia inicjacji U_i
1.	Inicjacja wyładowania (strimery 1. bądź 2. rodzaju)	$U = U_i$
2.	Rozwój strimerów typu „stopping lenght” osiągających max. 80% danej przerwy elektrodowej	$U = 1,2 - 1,6 U_i$
3.	Propagacja powolnych strimerów 2. rodzaju do płyty izolacyjnej na elektrodzie uziemionej (bez przebicia i bez pojawienia się kanału powrotnego)	$U = 1,4 - 1,6 U_i$
4.	Propagacja powolnych strimerów 2. rodzaju do płyty izolacyjnej na elektrodzie uziemionej (bez przebicia, ale z generacją wyładowań ślizgowych na powierzchni płyty oraz z generacją kanału powrotnego) – czas do osiągnięcia przez strimery płyty izolacyjnej powyżej 10 μs	$U = 1,4 - 2 U_i$
5.	Propagacja szybkich strimerów 3. rodzaju do płyty izolacyjnej ułożonej na elektrodzie uziemionej (bez przebicia, ale jak wyżej, z generacją wyładowań ślizgowych i kanału powrotnego) – czas do osiągnięcia przez strimery płyty izolacyjnej poniżej 2 μs	$U = 2 - 2,4 U_i$
6.	Intensyfikacja zjawisk propagacji strimerów 3. rodzaju wraz generacją kanału powrotnego o dużej energii i emitującego bardzo intensywne światło – czas do osiągnięcia przez strimery płyty izolacyjnej poniżej 1 μs	$U = 2,2 - 3 U_i$
7.	Przebiecie w wyniku rozwoju wyładowań szybkich (3. bądź 4. rodzaju) poprzez zwarcie elektrod przez powierzchnię płyty izolacyjnej lub skrośnięcie z przebiciem płyty – czas do przebicia poniżej 1 μs	$U > 3 U_i$

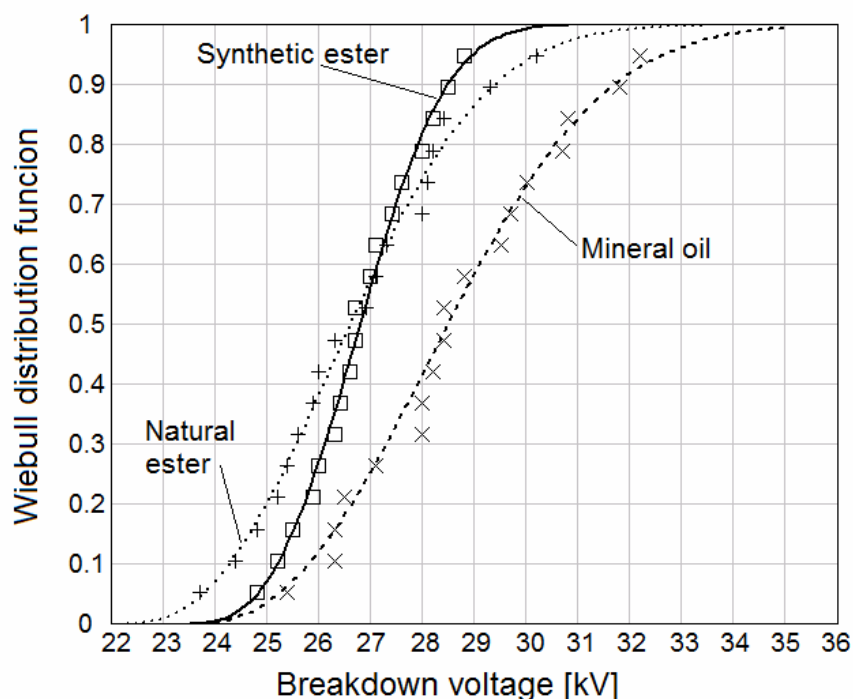
Wniosek ten jednak skomentowano także w odniesieniu do wcześniej przedstawionych teorii propagacji. Można było więc wywnioskować, że oba estry są bardziej podatne na rozwinięcie się w nich pod wpływem przepięć natury udarowej takich kanałów wyładowczych, których propagacja odbywa się jako wynik jonizacji w fazie ciekłej. Są to kanały bardziej energetyczne niż te 2-go rodzaju, w efekcie czego przebicie, do którego może dojść, także charakteryzuje się intensywniejszym oddziaływaniem na elementy izolacji stałej. Przypuszcza się, że struktura cząsteczkowa estrów, w której pojawiają się np. elektroujemne atomy tlenu, może powodować takie zachowanie estrów przy wyższych napięciach probierczych. W węglowodorach, bowiem strimery ulegają przyspieszeniu gdy dodaje się do nich cząsteczki o niskim potencjale jonizacyjnym,

a takimi są właśnie cząsteczki tlenu. Biorąc dodatkowo pod uwagę, że teoria o możliwej jonizacji twardych molekuł w cieczy w wysokim polu elektrycznym jest prawdziwa, to generacja strimerów 3-go rodzaju, które zgodnie z tą teorią są wynikiem takiego typu jonizacji, może zajść w estrach przy znacznie niższym napięciu niż w oleju mineralnym. Jest tak dlatego, że w estrach łatwiej dojdzie do bezpośredniego zjonizowania takich molekuł lub do ich rotacyjno-wibracyjnego wzbudzenia.

12. Rozga P.: Using the three-parameter Weibull distribution in assessment of threshold strength of pressboard impregnated by different liquid dielectrics, IET Science, Measurement and Technology, e-first, 2016, 6 pages

Jako odpowiedź na pewne wątpliwości recenzentów pojawiające się przy ocenie kolejnych publikacji, jak również jako odpowiedź na dyskusje pojawiające się podczas konferencji, gdzie wygłaszane były referaty obejmujące swoim zakresem wyniki badań eksperymentalnych nad estrami izolacyjnymi, w artykule przedstawiono w szczególności słuszność stosowania rozkładu Weibulla w postaci trójparametrycznej do oceny napięć przebicia układów o izolacji papierowo-olejowej na przykładzie badań wytrzymałości elektrycznej preszpanów impregnowanych różnymi cieczami dielektrycznymi. Postać trójparametryczna uznawana jest za doskonały rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej, który można dostosować do zagadnień natury wytrzymałościowej. Wyznacza się wtedy, obok parametru skali i kształtu, parametr przesunięcia X_0 , który oznacza wartość progową, dla której $F(X_0) = 0$. W odniesieniu do napięć przebicia czy napięć inicjacji wartość ta oznacza próg wytrzymałości danego układu izolacyjnego, a więc wartość napięcia, poniżej której odpowiednio nie dojdzie do przebicia czy też nie zostanie zainicjowane wyładowanie. Powszechnie uważa się, że trójparametryczny rozkład Weibulla dobrze sprawdza się w sytuacji, gdy rozpatrywany wektor zmiennej losowej jest wektorem o dużej liczności (kilkadziesiąt elementów i więcej). Doświadczenia Zakładu Wysokich Napięć Instytutu Elektroenergetyki wskazały, że także dla wektora o mniejszej liczności można uzyskać wiarygodne wyniki analizy statystycznej. W związku z tym, w pracy dokonano wyboru rozkładu Weibulla do analizy wyników pomiarów wytrzymałości elektrycznej uprzednio wysuszonych próbek preszpanów o grubościach 0,5 i 1 mm zaimpregnowanych olejem mineralnym oraz dwoma typami estrów użytych także w badaniach propagacji wyładowań elektrycznych: naturalnym i syntetycznym. Wektor zmiennej losowej w każdym przypadku zawierał 18 elementów oznaczających wartość napięcia przebicia kolejnych próbek. Znaczącą część pracy, najważniejszą z punktu widzenia wskazanego szczególnego osiągnięcia naukowego, poświęcono jednakże przedstawieniu samego podejścia do obliczeń parametrów rozkładu Weibulla z wykorzystaniem metody największej wiarygodności zaaplikowanej w programie MOSTAT, stworzonym i rozwijanym od wielu lat przez pracowników Zakładu Wysokich Napięć PŁ. Przedstawiono ogólną postać funkcji wiarygodności, dla której poszukiwane ekstrema wyznacza się na bazie rozwiązania układu trzech równań różniczkowych o szukanych będących parametrami rozkładu Weibulla. Wspomniano także, co jest nieodzowne w zagadnieniach szacowania statystycznego, o sposobie weryfikacji hipotezy o zgodności otrzymanej dystrybuanty teoretycznej wykreślonej na podstawie otrzymanych parametrów z dystrybuantą empiryczną bazując na teście zgodności χ^2 . Wyniki zbiorczo przedstawione zostały zarówno w formie tabelarycznej jak i porównawczo wykreślonych dystrybuant dla dwóch typów preszpanów o wyżej wspomnianych grubościach. Wnioski z pracy wskazały na skuteczność procesu impregnacji niezależnie od tego, jakiej cieczy

użyto do impregnacji. We wszystkich przypadkach wytrzymałość preszpanu była na poziomie wymaganym przez stosowne normy. Poniżej (na rysunku 16) zaprezentowano pochodzący z pracy przykład zestawienia dystrybuant dla grubości preszpanu równego 0,5 mm.



Rys. 16. Dystrybuanty napięć przebicia 0,5 mm próbek preszpanu impregnowanych różnymi cieczami dielektrycznymi.

Dla samego osiągnięcia naukowego istotne jednak było to, że rozkład Weibulla w jego trójparametrycznej postaci doskonale sprawdził się w aspekcie oceny populacji napięć przebicia przy niewielkiej liczbie elementów wektora zmiennej losowej, który został zastosowany przy szacowaniu. W związku z tym, z powodzeniem można uznać wcześniej wykonywane analizy statystyczne na podobnych liczbowo próbkach losowych za prawidłowe i dające zadowalające i przede wszystkim wiarygodne statystycznie wyniki.

13. Rozga P.: Using the light emission measurement in assessment of electrical discharge development in different liquid dielectrics under lightning impulse voltage, *Electric Power Systems Research (Elsevier), e-first, 2016, 8 pages*

Obszerny artykuł opublikowany w czasopiśmie grupy "Elsevier" to podsumowanie prac badawczych związanych z analizą wyładowań elektrycznych w cieczach estrowych i oleju mineralnym, które oparte były na analizie rejestrowanych przebiegów światła emitowanego przez wyładowania elektryczne. Zgodnie z tym, co wskazuje tytuł publikacji, w sposób szczegółowy omówione zostały w niej możliwości wnioskowania o poszczególnych etapach rozwoju wyładowań w cieczach dielektrycznych na bazie rejestrowanych przebiegów czasowych emitowanego przez wyładowanie elektryczne światła. Literatura przedmiotowa wyraźnie wskazuje na możliwość interpretacji wyników pomiaru światła wyładowań elektrycznych w sposób taki, jakby reprezentowały one impulsy prądowe. Wiele prac badawczych udowodniło bowiem, że istnieje ścisła korelacja

pomiędzy prądem wyładowań a impulsowym światłem emitowanym w fazie inicjacji i propagacji.

Wyniki autorskich prac zostały zaprezentowane tradycyjnie w odniesieniu do trzech badanych cieczy i obu biegunowości napięcia udarowego piorunowego. W pierwszej, wprowadzającej części, szeroko przedstawiono stan wiedzy o wyładowaniach w cieczach tj. ich podstawowy podział na powolne i szybki z uwzględnieniem cech charakterystycznych poszczególnych stadiów rozwoju, a także opisano sposób rejestracji przebiegów światła z użyciem techniki fotopowielaczowej oraz założenia badań.

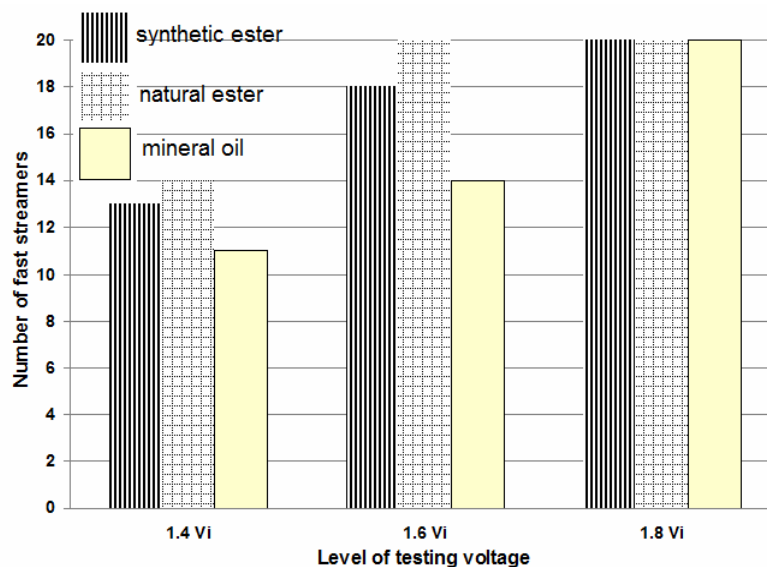
Część badawcza to z kolei szczegółowa analiza zarejestrowanych oscylogramów przedstawiona z podziałem na biegunowość udaru. Osiągnięciem naukowym w przypadku niniejszej pracy było przedstawienie dla każdego etapu rozwoju wyładowania w układzie ostrze-izolowana płyta (dla charakterystycznych napięć probierczych będących krotnością napięcia inicjacji) reprezentatywnych oscylogramów, które szczegółowo zostały skomentowane w zakresie możliwych do identyfikacji procesów wyładowczych (jonizacyjnych) determinujących propagację wyładowania w danej cieczy. Istotą tej szczegółowej analizy były spostrzeżenia dotyczące różnic w zarejestrowanych oscylogramach na każdym etapie rozwoju wyładowań w poszczególnych badanych cieczach. Intensywniejsze procesy zostały zaobserwowane w przypadku obu badanych estrów, co potwierdziło wcześniejsze przypuszczenia o gorszych ich właściwościach w aspekcie narażeń udarowych i większej podatności na rozwój energetycznych wyładowań szybkich. Artykuł jest generalnie rozwinięciem i zestawieniem właśnie od strony interpretacji oscylogramów światła wyników, które w węższym zakresie zostały przedstawione w publikacjach **8** i **10**. Trudno więc było oczekiwać innego typu wniosków. Jakkolwiek, na bazie studiów własnych habilitanta dotyczących zjawisk jonizacyjnych w cieczach, w szerszym zakresie skomentowano potencjalne źródło różnic wpływające na uzyskane wyniki. To źródło to niższa energia wzbudzenia rotacyjno-wibracyjnego twardych molekuł tworzących estry i jednocześnie niższa energia ich jonizacji. Tak więc, przy niższej wartości napięcia probierczego (niższej wartości natężenia pola elektrycznego wynikającego z geometrii elektrod i przyłożonego napięcia), dochodzi w estrach do bezpośredniej jonizacji cząstek cieczy pociągających za sobą pojawienie się szybkich wyładowań elektrycznych rozwijających się, zgodnie z teorią wyładowań w cieczach, jako rezultat tzw. jonizacji w fazie ciekłej.

14. Rozga P.: Streamer propagation and breakdown in very small point - insulating plate gap in mineral oil and ester liquids at positive lightning impulse voltage, Energies, Vol. 9, No. 6, 2016, pp. 467

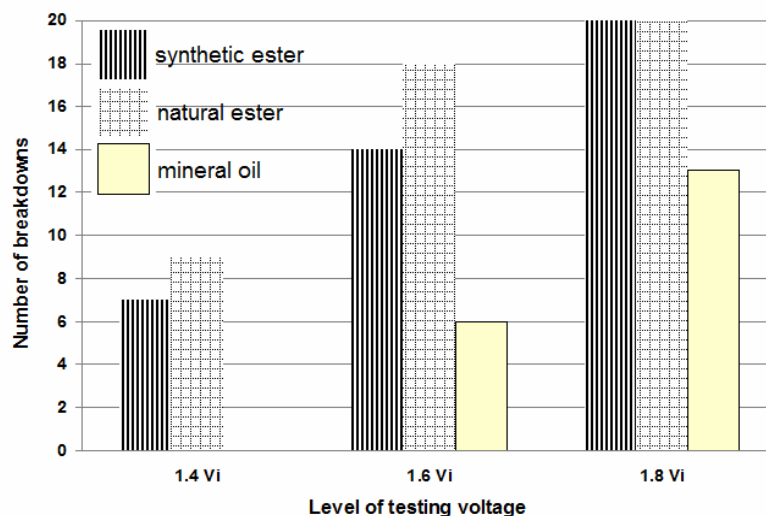
Celem prac badawczych, których wyniki opisano w niniejszym artykule była ocena porównawcza zachowania się estrów i oleju mineralnego w bardzo małej (10 mm) przerwie elektrodowej układu ostrze-izolowana płyta przy dodatnim napięciu udarowym piorunowym, gdzie obok zjawisk typowo obserwowanych dla wcześniej badanych większych przerw elektrodowych (15 i 20 mm) zaobserwowano także zjawisko przebicia. Tak więc spektrum porównawczo ocenianych zjawisk było szersze, co pozwoliło na głębsze spojrzenie na problematykę zachowania się badanych cieczy estrowych i oleju mineralnego w bardzo małych przerwach przy udarach piorunowych. Wybór udaru biegunowości dodatkowo wynikał ze znanego powszechnie faktu bardziej intensywnego oddziaływania wyładowań tego typu na układy izolacyjne typu ciecz-dielektryk stały.

W artykule porównywano zjawiska przedprzebiciowe i przebiciowe na bazie rejestrowanych oscylogramów oraz ilościowo oceniając liczbę danego typu zjawisk na

danym poziomie napięcia odniesioną do 20 uderzeń doprowadzonych do badanego układu elektrod. Podobnie jak dla większych przerw elektrodowych pomiary realizowano począwszy od napięcia inicjacji V_i i kontynuując je dla kolejnych krotności wyższych od napięcia inicjacji o krok $0,2 V_i$. Najistotniejsze wyniki obejmują, jak wzmiankowano wyżej, liczbowe zestawienie zaobserwowanych zjawisk dla krotności napięcia pomiędzy $1,4$ a $1,8 V_i$. Dla niższych wartości napięcia probierczego tj. napięcia inicjacji V_i i krotności $1,2 V_i$ uzyskane wyniki nie wskazały, aby w ocenianych zjawiskach inicjacji i propagacji wyładowań pojawiły się jakieś dodatkowe różnice pomiędzy badanymi cieczami ponad te charakterystyczne dla przerw 15 i 20 mm. Wyładowania rozwijały się zarówno w oleju mineralnym, jaki i obu estrach jako tzw. "stopping length" (przy napięciu inicjacji) oraz jako powolne docierające do płyty izolacyjnej, ale niepowodujące przebicia (przy $1,2 V_i$). Wracając jednak do wyższych napięć probierczych (wyższych krotności napięcia inicjacji) zestawienie wyników, które zamieszczono także w omawianej pracy, przytoczono poniżej na rysunkach 17 i 18.



Rys. 17. Liczba zaobserwowanych szybkich wyładowań elektrycznych na 20 uderzeń doprowadzonych do badanego układu elektrod ostrze-izolowana płyta o przerwie elektrodowej 10 mm.



Rys. 18. Liczba zaobserwowanych przebić na 20 uderzeń doprowadzonych do badanego układu elektrod ostrze-izolowana płyta o przerwie elektrodowej 10 mm.

Główny wniosek wyartykułowany w pracy dotyczył ponownie wskazania na niższą odporność estrów na pojawienie się szybkich i energetycznych wyładowań niż oleju mineralnego. Liczba tych wyładowań, zarejestrowana dla krotności napięć inicjacji pomiędzy 1,4 a 1,8 V_i była zawsze dużo wyższa w przypadku obu estrów niż w przypadku oleju mineralnego. Podobnie odporność estrów na formowanie się kanału przebiciowego w estrach oceniona została jako niższa - przebicia następowały niemal zawsze już od krotności napięcia inicjacji równej 1,6 V_i , podczas gdy dla oleju mineralnego, dla tego poziomu napięcia rejestrowano zarówno wyładowania powolne, jak również szybkie niedoprowadzające do przebicia, a kończąc na przebiciu podobnym do tego zachodzącego w estrach. Wniosek ten zdecydowanie został wzmocniony przy napięciu równym 1.8 V_i , co widać na przytoczonych rysunkach.

Odnosząc powyższe do teorii propagacji wyładowań elektrycznych w cieczach można przypuszczać, że również w bardzo małych przerwach elektrodowych w obu estrach szybciej, tj. przy niższym napięciu probierczym, dojdzie do zainicjowania takich wyładowań elektrycznych, 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 przebicia to jest ono charakteryzowane bardziej intensywnym oddziaływaniem na izolację stałą, która łatwiej może przez to ulec uszkodzeniu. W tym zakresie stosowny komentarz odnośnie większego oddziaływania kanału przebiciowego na powierzchnię płyty izolacyjnej użytej w eksperymencie, gdy cieczą badaną był jeden z estrów, pojawił się w omawianej publikacji.

Jak w przypadku publikacji 13 odpowiednie wnioski zostały także sformułowane odnośnie fizycznych aspektów związanych z gorszymi właściwościami estrów przy narażeniach udarowych niż badanego oleju mineralnego.

5.3 Podsumowanie

Głównym autorskim zadaniem habilitanta zrealizowanym w ramach prac stanowiących jednotemtny cykl publikacji było zbadanie sposobu propagacji wyładowań elektrycznych w syntetycznym i naturalnym estrze biodegradowalnym w polu nierównomiernym w układzie elektrod ostrze-izolowana płyta przy wysokim napięciu udarowym piorunowym i ocena tej propagacji poprzez porównanie otrzymanych wyników badań z wynikami dotyczącymi oleju mineralnego jako cieczy odniesienia, dla której mechanizm inicjacji i propagacji jest w pewnym zakresie poznany.

Zaproponowany w badaniach układ elektrod ostrze-izolowana płyta pozwolił na przeprowadzenie pomiarów w szerokim zakresie napięć probierczych bez rejestracji zjawiska przebicia (dla 15 i 20 mm przerwy elektrodowej), które znacząco ogranicza możliwości wnioskowania o sposobie propagacji (jak to miało miejsce przykładowo dla bardzo małej przerwy 10 mm). Sposób postępowania w trakcie wykonywanych pomiarów, a więc przyjęty plan badań i droga jego realizacji były indywidualnym autorskim podejściem, które zostało pozytywnie ocenione, czego efektem były opublikowane recenzowane prace przedstawione zarówno w ramach konferencji międzynarodowych jak i w czasopiśmie z listy JCR.

Założenia prac zostały wykonane w całości dając jednoznaczną odpowiedź odnośnie różnic w sposobie propagacji wyładowań w cieczach estrowych w odniesieniu do oleju mineralnego, przy czym sformułowano na podstawie wykonanych badań wnioski o źródle różnic upatrywanych w odmiennym składzie chemicznym badanych cieczy. Ten skład chemiczny istotnie wpływa na fakt rozwoju energetycznych wyładowań szybkich,

które są rezultatem mechanizmu jonizacji w fazie ciekłej, która z kolei zachodzi przy udziale procesów jonizacji molekuł cieczy o niskim potencjale jonizacyjnym, a te właśnie można wyodrębnić w strukturze chemicznej obu estrów. Dodatkowo wiązania estrowe łatwiej ulec mogą rotacyjno-wibracyjnemu wzbudzeniu, który to proces może przyspieszyć rozwój wyładowań szybkich w estrach przy niższym napięciu probierczym niż w oleju mineralnym.

Otrzymane wyniki pozwoliły także sformułować problematykę dalszych prac naukowo-badawczych habilitanta - fizyka zjawisk przedprzebieciowych i przebieciowych w cieczach estrowych, jeśli przyjąć słuszność wniosków płynących z prac wykonanych dotychczas, może być bowiem poznana poprzez badania z użyciem techniki spektrometrii optycznej widm wyładowań elektrycznych rozwijających się w poszczególnych cieczach oraz wspomoczenie tych badań analizą gazów rozpuszczonych w danej cieczy na skutek propagacji wyładowań elektrycznych i na skutek zaistniałego przebiecia.

Literatura

(wybrane pozycje z zakresu prowadzonych przez habilitanta prac naukowo-badawczych)

- [1] Jabłoński M., Badanie transformatorów w przemyśle i eksploatacji, WNT, Warszawa, 1969.
- [2] Szczepański Z. (red.), Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych, WNT, Warszawa, 1978.
- [3] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A., Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa, 1983.
- [4] Jezierski E., Transformatory, WNT, Warszawa, 1983.
- [5] Jezierski E. (red.), Kadzie, wyposażenie i transport transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa, 1986.
- [6] Mosiński F., Podstawy techniki wysokich napięć, Wyd. PŁ, Łódź, 1991.
- [7] Subocz J. (red.), Transformatory w eksploatacji, Wydawnictwo Energo-Complex, 2007.
- [8] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, Energopomiar-Elektryka, Gliwice, 2012.
- [9] Oommen T.V., Clairborne C.C., Mullen J.T., Biodegradable electrical insulation fluids, *Proced. of Electr. Insul. Conf.*, 1997, pp. 465-468.
- [10] McShane C.P., Vegetable-oil-based dielectric coolants, *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 2, 2002, pp. 34-41.
- [11] Bertrand Y., Hoang L.C., Vegetable oils as a substitute for mineral insulating oils in medium voltage equipments, *Cigre Session*, 2004, Paper D1-202.

- [12] Borsi H., Gockenbach E., Properties of ester liquid Midel 7131 as an alternative liquid to mineral oil for transformers, IEEE Int. Conf. Dielectr. Liquids, 2005, pp. 377-380.
- [13] Perrier C., Beroual A., Bessede J-L., Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 13, 2006, pp. 556-564.
- [14] Gockenbach E., Borsi H., Natural and synthetic ester liquids as alternative to mineral oil for power transformers, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., 2008, pp. 521-524.
- [15] Perrier C., Beroual A., Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester and silicone oils, IEEE Elect. Insul. Mag., vol. 25, 2009, pp. 6-13.
- [16] Mosiński F., Ekologiczne aspekty eksploatacji transformatorów energetycznych, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 3, 2009.
- [17] Pukel G. J., Schwarz R., Schatzl F., Bauman F., Gertstl A., Environmental friendly insulating liquids - a challenge for power transformers, 2009 Cigre Southern Africa Regional Conf., Paper P510.
- [18] Lijao R., Hao J., Chen G., Ma Z., Yang L., A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 18, 2011, pp. 1626-1637.
- [19] Cigre brochure 436, Experiences in service with new insulating liquids, 2011.
- [20] Lashbrook M., Kuhn M., The use of ester transformer fluids for increased fire safety and reduced costs, Cigre Session, 2012, Paper A2-210.
- [21] Fernández I., Delgado F., Renedo C., Pérez S., Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers, Electr. Power Syst. Research, vol. 98, 2013, pp. 58-69.
- [22] Różga P., Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers, Proceedings of 1st Annual Intern. Interdisciplinary Conf., Azores Islands, Portugal, 2013.
- [23] Szewczyk R., Vercesi G., Innovative insulation materials for liquid-immersed transformers, DuPont Webinar presented on 13 March 2015.
- [24] Różga P., Piotrowski T., Wybrane aspekty współpracy izolacji stałej z cieczami dielektrycznymi będącymi alternatywą dla oleju mineralnego, Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji Transformatorowej "Transformator", Gdańsk, 2015, s. 91-102.

- [25] Loiseau L., Fofana I., Sabau J., Magdaleno-Adame S., Olivares-Galvan J.C., Comparative studies of the stability of various fluids under electrical discharge and thermal stresses, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, 2015, pp. 2491 - 2499.
- [26] Bandara K., Ekanayake C., Saha T., Ma H., Performance of natural ester as a transformer oil in moisture-rich environments, *Energies*, vol. 9, 2016, pp. 258.
- [27] Celiński Z., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*, Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2011.
- [28] Pukel G.J., Eberhardt R., Muhr H.M., Bauman F., Lick W., Large power transformers for alternative insulating fluids, *Proce. of the 16th Intern. Symp. High Volt. Eng.*, 2009, Paper F-27.
- [29] Rapp K.J., Luksich J., Sbravati A., Application of natural ester insulating liquids in power transformers, *Proce. of My Transfo*, 2014, pp. 1-7.
- [30] Crowe R.W., Sharbaugh A.H., Bragg J.K., Electric strength and molecular structure of saturated hydrocarbon liquids, *J. Appl. Phys.*, vol. 25, 1954, pp. 1480-1484.
- [31] Sharbaugh A.H., Crowe R.W., Cox E.B., Influence of molecular structure upon the electric strengths of liquid hydrocarbons, *J. Appl. Phys.*, vol. 27, 1956, pp. 806-808.
- [32] Lewis T.J., Mechanism of electrical breakdown in saturated hydrocarbons liquids, *J. Appl. Phys.*, vol. 27, 1956, pp. 645-650.
- [33] Ward B.W., Lewis T.J., A new statistical theory for the breakdown of liquid hydrocarbons, *J. Electrochem Soc.*, vol. 107, 1960, pp. 191-195.
- [34] Adamczewski I., *Jonizacja i przewodnictwo ciekłych dielektryków*, PWN, Warszawa, 1965.
- [35] Coelho R., Debeau J., Properties of tip-plane configurations. *J. Phys. D*, vol. 4, 1971, pp. 1266-1280.
- [36] Sharbaugh A.H., Devins J.C., Rzed S.J., Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquid, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, 1978, pp. 249-276.
- [37] Devins J.C., Rzed S.J., Schwabe R.J., Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids. *J. Appl. Phys.*, vol. 52, 1981, pp. 4531-4545,
- [38] Wong P.P., Forster E.O., The dynamic of electrical breakdown in liquid hydrocarbons, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 17, 1982, pp. 203-220.
- [39] Beroual A., Tobazeon R., Prebreakdown phenomena in liquid dielectrics, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 21, 1986, pp. 613-627.

- [40] FitzPatrick G.J., Forster E.O., Hebner R.E., Kelley E.F., Prebreakdown cathode processes in liquid hydrocarbons, IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 22, 1987, pp. 453-458.
- [41] Hebner R.E., Measurement of electrical breakdown in liquids, NATO ASI series, vol. B193, Plenum press, 1988.
- [42] Wintenberg A.L., Pace M.D., Balock T.V., Foust J.V., Prebreakdown current pulses in n-Hexane and other dielectrics fluids, IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 24, 1989, pp. 67-74.
- [43] Chandband W.G., The electrical breakdown of insulating oil, Power Eng. Journal, March 1992, pp. 61-67.
- [44] Beroual A., Electronic and gaseous processes in prebreakdown phenomena of dielectric liquids, J. Appl. Phys., vol. 73, 1993, pp. 4528-4532.
- [45] Brosseau C., Beroual A., Optical investigation of high-field conduction and prebreakdown in a dielectric liquid. IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., vol. 1, 1994, pp. 397-402.
- [46] Tobazeon R., Prebreakdown phenomena in dielectric liquids, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 1, 1994, pp. 1132 - 1147.
- [47] Chandband W.G., The ubiquitous positive streamer, IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 23, 1986, pp. 697-706.
- [48] Lesaint O., Gournay P., Initiation and propagation thresholds of positive prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 1, 1994, pp. 702-708.
- [49] Linhjell D., Lundgaard L., Berg G., Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 1, 1994, pp. 447-458.
- [50] Torshin Yu.V., On existence of leader discharges in mineral oil, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 2, 1995, pp. 167 - 179.
- [51] Beroual A. i inni, Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics, IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 14, 1998, pp. 6-17.
- [52] Yamashita H., Amano H., Prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, 1998, pp. 739-750.
- [53] Lesaint O., Massala G., Positive streamer propagation in large oil gaps: Experimental characterization of propagation mode, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 5, 1998, pp. 360-370.

- [54] Lundgaard L., Linhjell D., Berg G., Sigmond S., Propagation of positive and negative streamers in oil with and without pressboard interfaces, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 5, 1998, pp. 388-395.
- [55] Galczak J., Electrical discharges in transformer oil in set-up of paper insulated electrodes, *Archives of Electr. Eng.*, vol. XLVIII, 1999, pp. 155-172.
- [56] Massala G., Lesaint O., A comparison of negative and positive streamers in mineral oil at large gaps, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 34, 2001, pp. 1525-1532.
- [57] Top T., Massala G., Lesaint O., Streamer propagation in mineral oil in semi-uniform geometry, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, 2002, pp. 76-83.
- [58] Galczak J., Electrical discharges in mineral oil developing from insulated transformer wire to plane, *Archives of Electr. Eng.*, vol. XLVIII, 2004, pp. 353-367.
- [59] Galczak J., Electrical discharges in mineral oil developing from insulated transformer wire to plane. *Archives of Electr. Eng.*, vol. LIII, 2004, pp. 353-367.
- [60] Ushakov Y.Y., Klimkin V.F., Korobeynikov S.M., *Impulse breakdown of liquids*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007.
- [61] Torshin Yu.V, Schlieren registration of electrohydrodynamics phenomena in dielectric liquids under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, 2009, pp. 470-474.
- [62] Rozga, P., The influence of paper insulation on the prebreakdown phenomena in mineral oil under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 11, 2011, pp. 720-727.
- [63] Beroual A., Electronic processes and streamer propagation phenomena in liquid dielectrics. *Archives of Electr. Eng.*, vol. XLIV, 1995, pp. 579-592.
- [64] Rozga P., Stanek M., Cieslinski D., Comparison of properties of electrical discharges developing in natural and synthetic esters at inception voltage, *Annual Report Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom*, 2013, pp. 891-894.
- [65] Rozga P., Stanek M., Positive streamer propagation in natural ester and mineral oil under lightning impulse, *Intern. Symp. High Volt. Eng.*, 2015, Paper 73.
- [66] Rozga P., Streamer propagation in small gaps of synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, 2015, pp. 2754-2762.
- [67] Rozga P., Stanek M., Characteristics of streamers developing at inception voltage in small gaps of natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse, *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 10, 2016, pp. 50-57.

- [68] Rozga P., Streamer propagation in a non-uniform electric field under lightning impulse in short gaps insulated with natural ester and mineral oil, *Bull. Polish Ac. Sc., Techn. Sc.*, vol. 64, 2016, pp. 171-179.
- [69] Rozga P., Streamer propagation and breakdown in very small point - insulating plate gap in mineral oil and ester liquids at positive lightning impulse voltage, *Energies*, vol. 9, 2016, pp. 467.
- [70] Rozga P., Using the light emission measurement in assessment of electrical discharge development in different liquid dielectrics under lightning impulse voltage, *Electric Power Sys. Research*, 2016, pp. 1-8.
- [71] Lidmanowski W., *Zarys teorii wyładowań w dielektrykach*, WNT, Warszawa, 1988.
- [72] Meek J.M., Craggs J.D., *Electrical breakdown of gases*, John Wiley & Sons, 1978.
- [73] Gournay P., Lesaint O., A study of inception of positive streamers in cyclohexane and pentane, *J Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 26, 1993, pp. 1966-1974.
- [74] Lewis T.J., A new model for primary process of electrical breakdown in liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 5, 1998, pp. 306 - 315.
- [75] Yamashita H., Yamazawa K., Wang Y.S., The effect of tip curvature on the prebreakdown streamer structure in cyclohexane, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 5, 1998, pp. 396-401.
- [76] Dumitrescu L., Lesaint O., Bonifaci N., Denat A., Study of streamer inception in cyclohexane with a sensitive charge measurement technique under impulse voltage, *J. Electrostat.*, vol. 53, 2001, pp. 135-146.
- [77] Lesaint O., Top T., Streamer initiation in mineral oil, Part I: Electrode surface effect under impulse voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, 2002, pp. 84-91.
- [78] Kim M., Hebner R.E., Initiation from a point anode in a dielectric liquid, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, 2006, pp. 1254-1260.
- [79] Różga P., Zastosowanie symulacji rozkładu pola elektrycznego w przestrzeni 3D do oceny procesu inicjacji wyładowań elektrycznych w oleju, *Przegląd Elektrotechniczny*, 6'2014, s. 216-221.
- [80] Denat A., Gosse J.P., Gosse B., Electrical conduction of purified cyclohexane in a divergent electric field, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, 1988, pp. 545-554.
- [81] Denat A., High field conduction and prebreakdown phenomena in dielectric liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, 2006, pp. 518-525.

- [82] Kattan R., Denat A., Lesaint O, Generation, growth, and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids under a high divergent electric field, *J. Appl. Phys.*, vol. 66, 1989, pp. 4062-4066.
- [83] Duy C.T., Lesaint O., Bonifaci N., Denat A., Bertrand Y., High voltage breakdown and pre-breakdown properties in rape-seed insulating oil, *Annual Report Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom.*, 2007, pp. 623-626.
- [84] Duy, C.T., Lesaint, O., Denat, A., Bonifaci, N., Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, 2009, pp. 1582-1594.
- [85] Liu Q., Wang Z.D., Perrot F., Impulse breakdown voltages of ester-based transformer oils determined by using different test method, *Annual Report Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom.*, 2009, pp. 608-612.
- [86] Dang V-H., Beroual A., Perrier C., Comparative study of streamer phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage, *Intern. Conf. High Vol. Eng. Appl.*, 2010, pp. 560-563,
- [87] 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.*, vol. 18, 2011, pp. 285-294.
- [88] Liu Q. Wang Z.D, Secondary reverse streamer observed in an ester insulating liquid under negative impulse voltage, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 44, 2011, pp. 405203.
- [89] 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.*, vol. 19, 2012, pp. 1521-1527.
- [90] A. Beroual, Spectral analysis of light emitted by streamers and gas chromatography in liquid dielectrics, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, 1993, pp. 5615-5620.
- [91] Mosinski F., Piotrowski T., New statistical methods for evaluation of DGA data, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, 2003, pp. 260-265.
- [92] Piotrowski T., Probability distribution of gases dissolved in oil of failed power transformers, *Intern. Conf. High Voltage Eng. Applic.*, 2014, pp. 4.
- [93] Piotrowski T., Rozga P., Kozak R., Analysis of excessive hydrogen generation in transformers in service, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, 2015, pp. 3600-3607.
- [94] Bonifaci N., Denat A., Spectral analysis of light emitted by prebreakdown phenomena in non-polar liquids and gases, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, 1991, pp. 610-614.

[95] Barmann P., Kroll S., Sunesson A., Spectroscopic measurements of streamer filaments in electric breakdown in a dielectric liquid, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 29, 1996, pp. 856-863.

[96] Denat A., Bonifaci N., Nur M., Spectral analysis of light emitted by streamers in dielectric liquids, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 5, 1998, pp. 382-387.

[97] Różga P., Tabaka P., Spectroscopic measurements of electrical breakdown in various dielectric liquids, IEEE 11th Intern. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Materials (ICPADM), 2015, pp. 524-527.



.....
Podpis