



**WŁAŚCIWOŚCI DIELEKTRYCZNE SYNTETYCZNYCH I
NATURALNYCH ESTRÓW BIODEGRADOWALNYCH
DO ZASTOSOWAŃ ELEKTRYCZNYCH ZE
SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM ICH
WYTRZYMAŁOŚCI UDAROWEJ**

*Paweł Rózga, Marcin Stanek
Politechnika Łódzka
Instytut Elektroenergetyki*

Unormowania dotyczące cieczy dielektrycznych



Dla olejów mineralnych:

PN-EN 60296: 2012 Ciecze stosowane w elektrotechnice -
Świeże mineralne oleje elektroizolacyjne do transformatorów
i aparatury łączeniowej;

Dla estrów syntetycznych:

PN-EN 61099: 2011 Ciecze elektroizolacyjne - Wymagania
techniczne dla świeżych syntetycznych estrów organicznych
do zastosowań elektrycznych;

Dla estrów naturalnych:

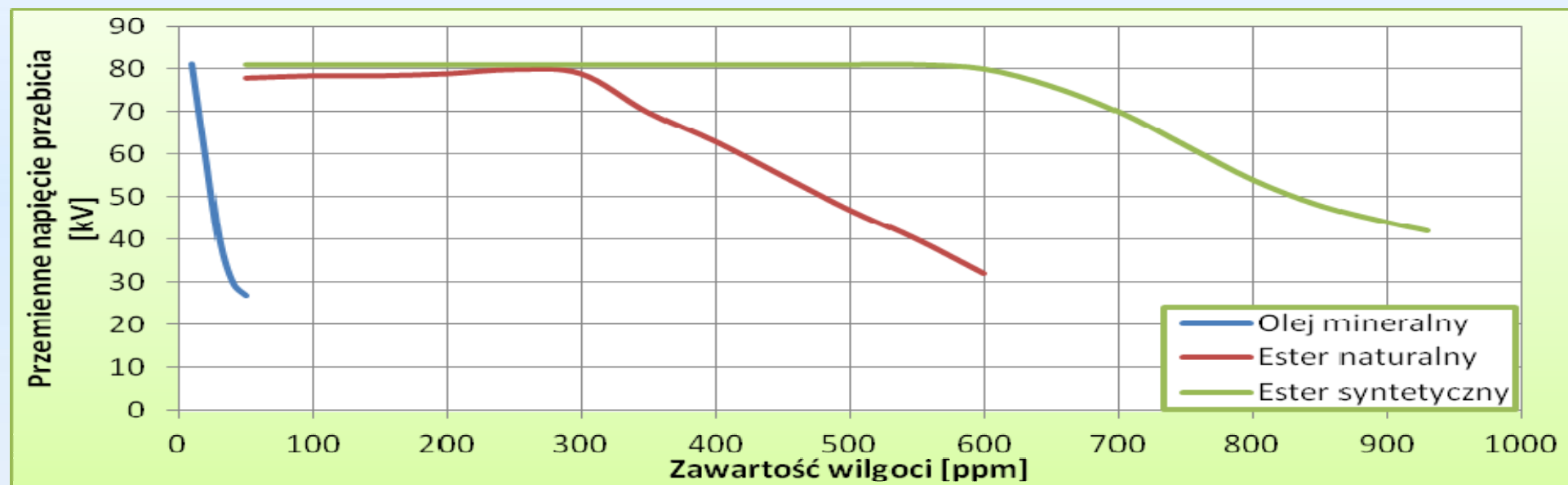
PN-EN 62770: 2014 Ciecze stosowane w elektrotechnice -
Świeże naturalne estry do transformatorów i podobnych
urządzeń elektrycznych.

Zestawienie porównawcze parametrów wybranych cieczy dielektrycznych



	Jednostki	Ester syntetyczny (Midel 7131)	Ester syntetyczny (Envirotemp 200)	Ester naturalny (Envirotemp FR3)	Ester naturalny o obniżonej lepkości (Nomex 970FLD)	Ester naturalny (Midel eN 1204)	Olej mineralny (Shell Diala Oil)
Właściwości fizykochemiczne							
Gęstość w 20°C	kg / dm ³	0,97	0,97	0,92	0,89	0,92	0,88
Ciepło właściwe w 20°C	J / kg K	1880	-	1848	1950	1849	1860
Przewodność cieplna w 20°C	W / m K	0,144	-	0,177	0,147	0,177	0,126
Lepkość kinematyczna w 100°C	mm ² / s	5,25	5,6	8,0	4,6	9,3	2,6
Temperatura krzepnięcia	C	-60	-54	-21	-28	-31	-50
Temperatura zapłonu	C	316	310	360	270	350	170
Temperatura palenia	C	260	265	316	190	260	150
Klasyfikacja zagrożenia pożarowego według IEC 61100 / IEC 61039	-	K3	K3	K2	0	K2	0
Biodegradowalność	%	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	nie biodegradowalne
Właściwości dielektryczne							
Napięcie przebicia	kV	> 75	>75	> 75	>75	>75	>70
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ w 90°C	-	< 0,02	0,015	< 0,02	0,04	<0,03	< 0,002
Przenikalność elektryczna w 20°C	-	3,2	3,2	3,1	2,82	3,1	2,2

Zależność przemiennego napięcia przebicia od zawartości wilgoci (na podstawie [*])



Typowe wartości parametru nasycania wilgocią w temperaturze otoczenia:

- Olej mineralny: 55 ppm,
- Ester syntetyczny: 2700 ppm,
- Ester naturalny: 1100 ppm.

* - Cigre brochure 436, "Experiences in service with new insulating liquids", 2011

Zestawienie porównawcze parametrów wybranych cieczy dielektrycznych



	Jednostki	Ester syntetyczny (Midel 7131)	Ester syntetyczny (Envirotemp 200)	Ester naturalny (Envirotemp FR3)	Ester naturalny o obniżonej lepkości (Nomex 970FLD)	Ester naturalny (Midel cN 1204)	Olej mineralny (Shell Diala Oil)
Właściwości fizykochemiczne							
Gęstość w 20°C	kg / dm ³	0,97	0,97	0,92	0,89	0,92	0,88
Ciepło właściwe w 20°C	J / kg K	1880	-	1848	1950	1849	1860
Przewodność cieplna w 20°C	W / m K	0,144	-	0,177	0,147	0,177	0,126
Lepkość kinematyczna w 100°C	mm ² / s	5,25	5,6	8,0	4,6	9,3	2,6
Temperatura krzepnięcia	C	-60	-54	-21	-28	-31	-50
Temperatura zapłonu	C	316	310	360	270	350	170
Temperatura palenia	C	260	265	316	190	260	150
Klasyfikacja zagrożenia pożarowego według IEC 61100 / IEC 61039	-	K3	K3	K2	0	K2	0
Biodegradowalność	%	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	nie biodegradowalne
Właściwości dielektryczne							
Napięcie przebicia	kV	> 75	>75	> 75	>75	>75	>70
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ w 90°C	-	< 0,02	0,015	< 0,02	0,04	<0,03	< 0,002
Przenikalność elektryczna w 20°C	-	3,2	3,2	3,1	2,82	3,1	2,2

Współpraca estrów z izolacją stałą



Wartości natężenia pola elektrycznego w układzie uwarstwionym szeregowo przy zastosowaniu różnych cieczy dielektrycznych jako warstwy dielektryka ciekłego – natężenie pola elektrycznego wyznaczono dla warunków:

- napięcie przyłożone do układu $U = 120$ kV,
 - grubość warstwy cieczy $d_1 = 10$ mm,
 - grubość warstwy dielektryka stałego (preszpanu) $d_2 = 2$ mm;
- z zależności:

$$E_k = \frac{U}{\varepsilon_k \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\varepsilon_i}}$$

gdzie:

- U – napięcie przyłożone do układu,
- ε – przenikalność dielektryczna względna,
- a – grubość danej warstwy.

Olej mineralny		Ester syntetyczny		Ester naturalny	
Przenikalność cieczy	Przenikalność nasączonego papieru	Przenikalność cieczy	Przenikalność nasączonego papieru	Przenikalność cieczy	Przenikalność nasączonego papieru
2,2	4,4	3,2	4,7	3,1	4,6
Natężenie w cieczy	Natężenie w papierze	Natężenie w cieczy	Natężenie w papierze	Natężenie w cieczy	Natężenie w papierze
10,91 kV/mm	5,45 kV/mm	10,56 kV/mm	7,19 kV/mm	10,57 kV/mm	7,13 kV/mm
Różnica natężenia pomiędzy warstwami					
5,46 kV/mm		3,37 kV/mm		3,44 kV/mm	

Zestawienie porównawcze parametrów wybranych cieczy dielektrycznych



	Jednostki	Ester syntetyczny (Midel 7131)	Ester syntetyczny (Envirotemp 200)	Ester naturalny (Envirotemp FR3)	Ester naturalny o obniżonej lepkości (Nomex 970FLD)	Ester naturalny (Midel eN 1204)	Olej mineralny (Shell Diala Oil)
Właściwości fizykochemiczne							
Gęstość w 20°C	kg / dm ³	0,97	0,97	0,92	0,89	0,92	0,88
Ciepło właściwe w 20°C	J / kg K	1880	-	1848	1950	1849	1860
Przewodność cieplna w 20°C	W / m K	0,144	-	0,177	0,147	0,177	0,126
Lepkość kinematyczna w 100°C	mm ² / s	5,25	5,6	8,0	4,6	9,3	2,6
Temperatura krzepnięcia	C	-60	-54	-21	-28	-31	-50
Temperatura zapłonu	C	316	310	360	270	350	170
Temperatura palenia	C	260	265	316	190	260	150
Klasyfikacja zagrożenia pożarowego według IEC 61100 / IEC 61039	-	K3	K3	K2	0	K2	0
Biodegradowalność	%	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	łatwo biodegradowalne	nie biodegradowalne
Właściwości dielektryczne							
Napięcie przebicia	kV	> 75	>75	> 75	>75	>75	>70
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ w 90°C	-	< 0,02	0,015	< 0,02	0,04	<0,03	< 0,002
Przenikalność elektryczna w 20°C	-	3,2	3,2	3,1	2,82	3,1	2,2

Procedura wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy dielektrycznych



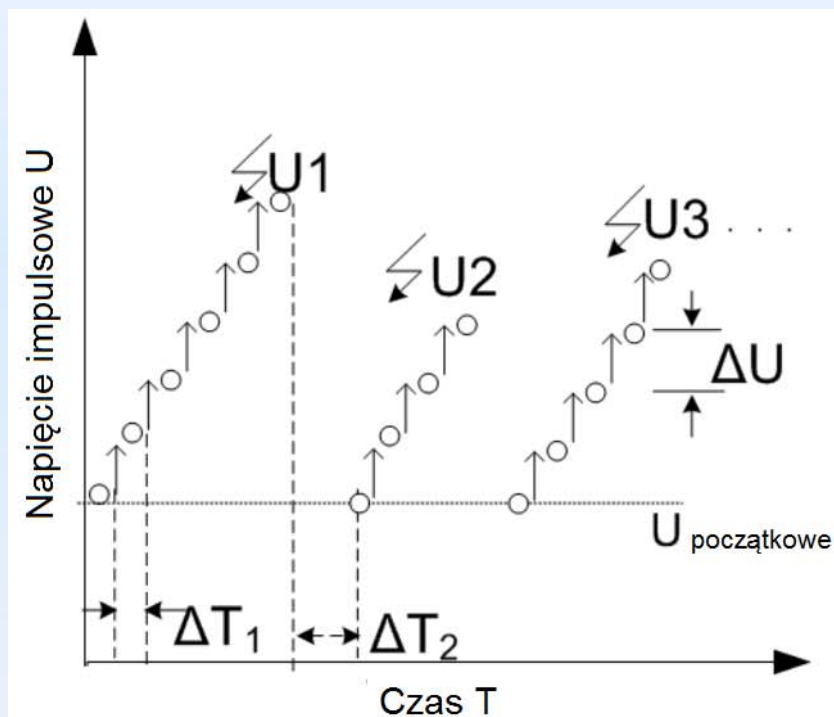
Normy narzucające procedury wyznaczania udarowego napięcia przebicia to:

- norma amerykańska ASTM D3300-12 „Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils of petroleum origin under impulse conditions”;
- norma europejska (polska) PN-IEC 897 „Metody wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy izolacyjnych”.

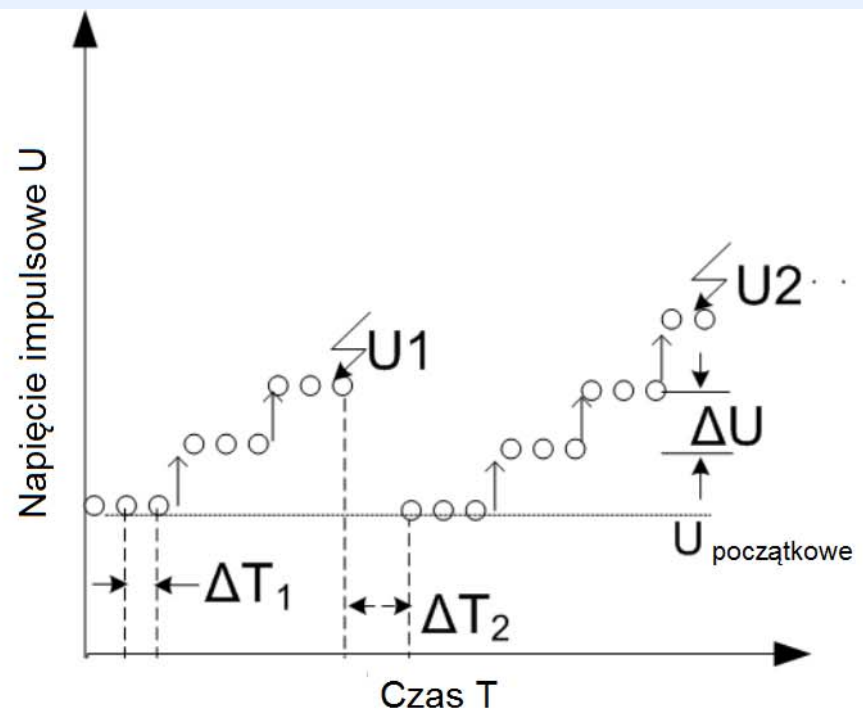
Procedura wyznaczania udarowego napięcia przebicia cieczy dielektrycznych



Szkic metod używanych do pomiaru udarowego napięcia przebicia cieczy



(a) 1 udar na stopień IEC 60897



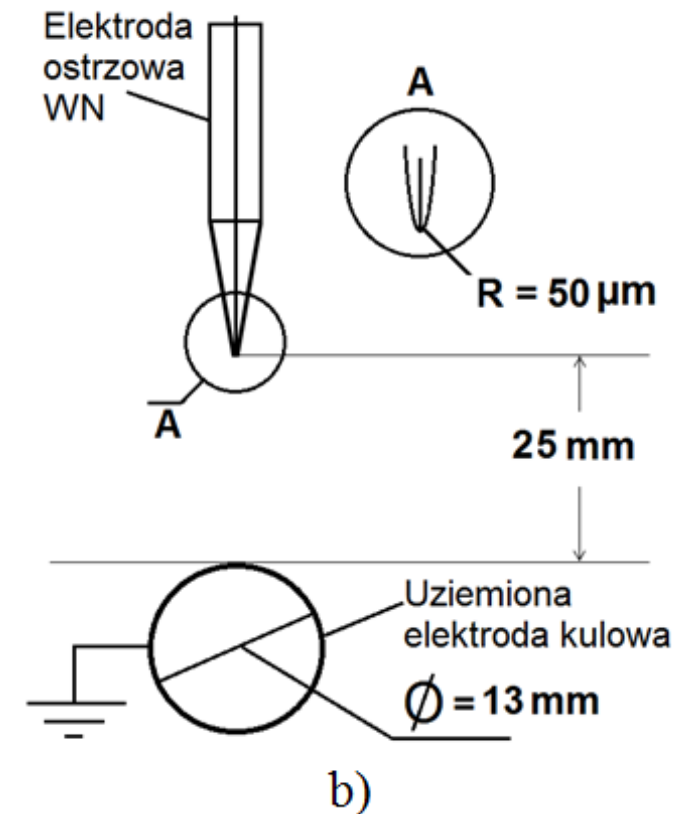
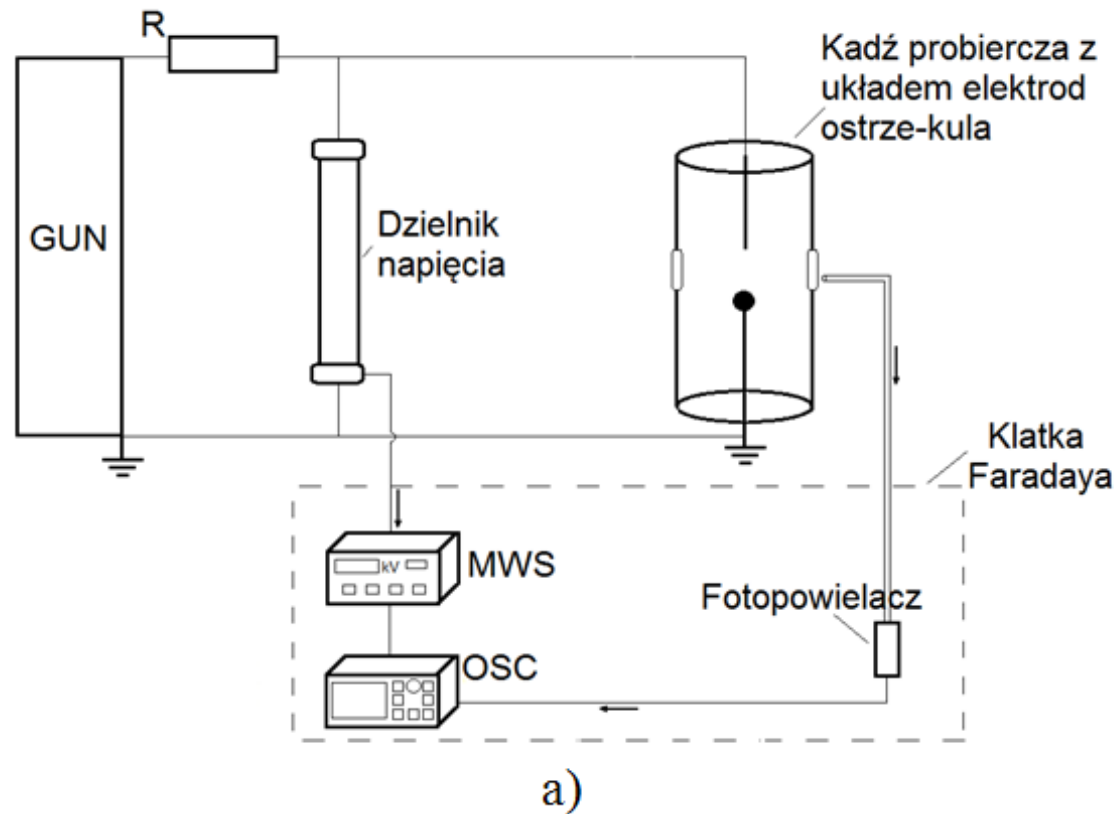
(b) 3 udary na stopień ASTM D 3300

- układ ostrze-kula o $d = 25$ mm (wyjątkowo 15 lub 10 mm);
- min. 3 stopnie przed przebiciem,
- $\Delta U = 5$ kV,

- układ kula-kula o $d = 3,8$ mm lub ostrze-kula o $d = 25,4$ mm;
- min. 3 stopnie przed przebiciem,
- $\Delta U = 5$ kV lub 10 kV,

W obu przypadkach wykonujemy 5 procedur pomiarowych i jako wynik podajemy wartość średnią i odchylenie standardowe

Udarowe napięcie przebicia – wyniki badań własnych



Układ eksperymentalny wykorzystany w badaniach autorskich: R - rezystor ograniczający, GUN - generator udarów napięciowych, MWS - miernik wartości szczytowej, OSC - oscyloskop (a) i układ elektrod zalecany przez normę IEC 897 (b).

Udarowe napięcie przebicia – wyniki badań własnych

Warunki eksperymentu:

1) Badane ciecze:

- Olej mineralny Shell Diala,
- Ester syntetyczny Envirotemp 200,
- Ester syntetyczny Midel 7131,
- Ester naturalny Nomex 970 FLD,
- Ester naturalny Envirotemp FR3.

2) Konfiguracja elektrod – zgodna z normą IEC (układ ostrze-kula o przerwie 25 mm).

3) Napięcie probiercze – udar napięciowy piorunowy 1,2/50 μ s obu biegunowości.

4) Sposób wyznaczania udarowego napięcia

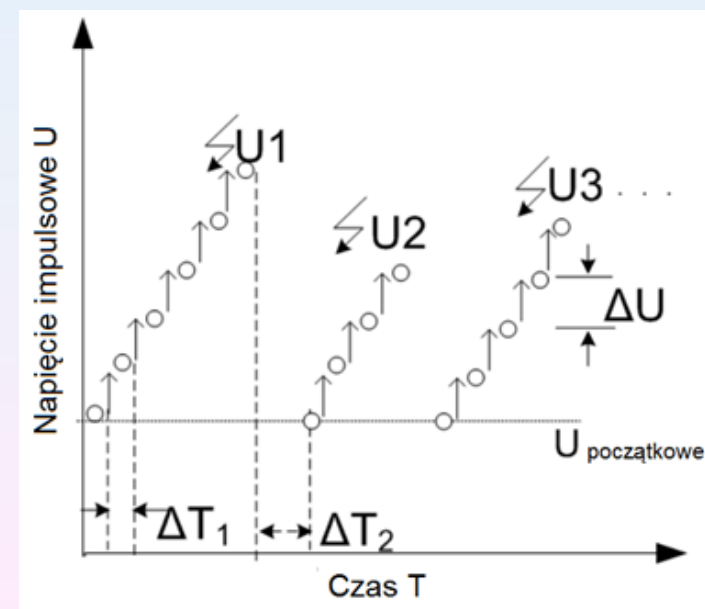
Przebiega: metoda schodkowa z 1 udarem na stopień,

$\Delta T_1 = 1$ minuta,

$\Delta T_2 = 30$ minut,

$\Delta U = 5$ kV,

Liczba procedur pomiarowych = 20.



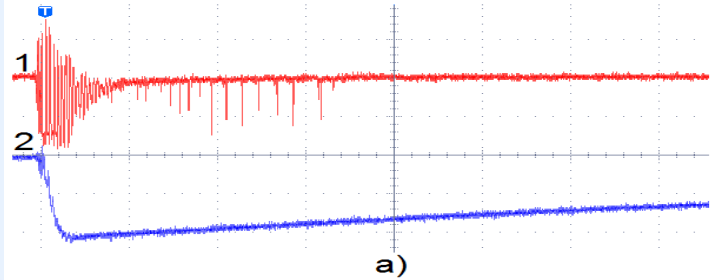
Udarowe napięcie przebicia – wyniki badań własnych

Ujemne udarowe napięcie przebicia oraz odpowiadający mu czas do przebicia

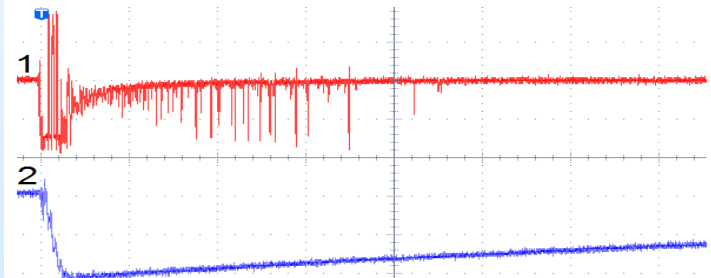
Rodzaj cieczy	Napięcie przebicia [kV]		Czas do przebicia [μ s]	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Olej mineralny Shell Diala	127,50	6,98	24,30	3,40
Ester syntetyczny Envirotemp 200	121,25	5,10	32,55	2,48
Ester syntetyczny Midel 7131	123,00	5,23	32,35	2,35
Ester naturalny Nomex 970 FLD	120,75	5,91	20,30	2,52
Ester naturalny Envirotemp FR3	123,25	4,94	19,40	3,14

Dodatnie udarowe napięcie przebicia oraz odpowiadający mu czas do przebicia

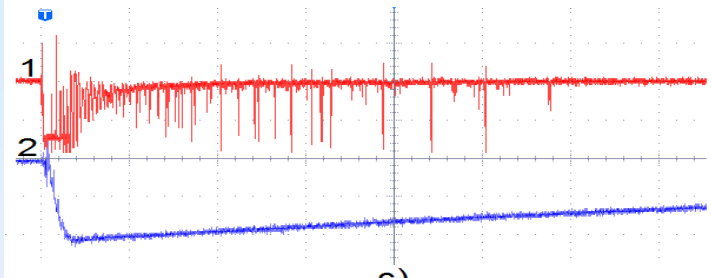
Rodzaj cieczy	Napięcie przebicia [kV]		Czas do przebicia [μ s]	
	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Olej mineralny Shell Diala	60,75	1,83	12,20	0,62
Ester syntetyczny Envirotemp 200	65,00	3,97	13,90	1,62
Ester syntetyczny Midel 7131	64,50	3,20	14,20	1,32
Ester naturalny Nomex 970 FLD	61,25	3,19	12,90	0,72
Ester naturalny Envirotemp FR3	69,25	2,45	15,25	1,48



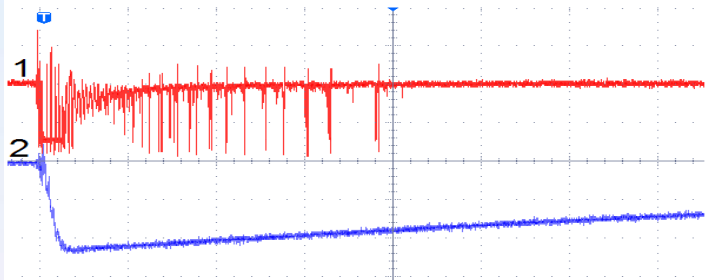
a)



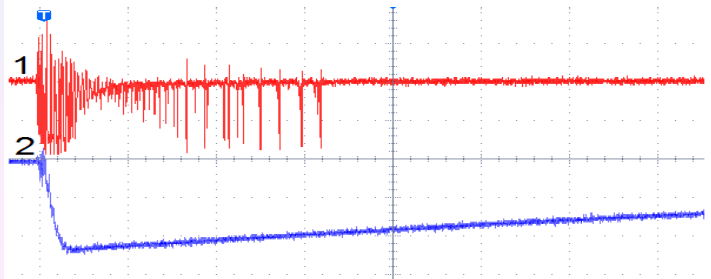
b)



c)



d)



e)

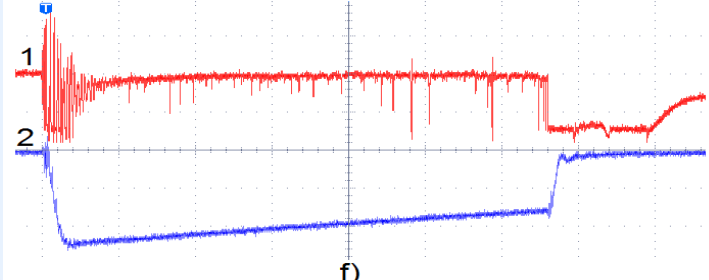
Olej mineralny

Ester syntetyczny
Envirotemp 200

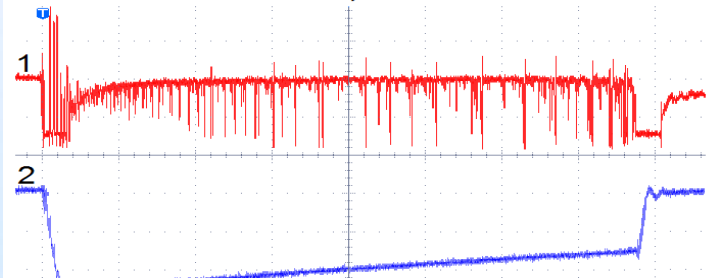
Ester syntetyczny
Midel 7131

Ester naturalny
Nomex 970 FLD

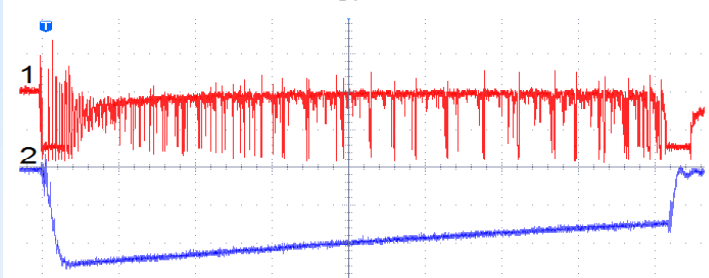
Ester naturalny
Envirotemp FR3



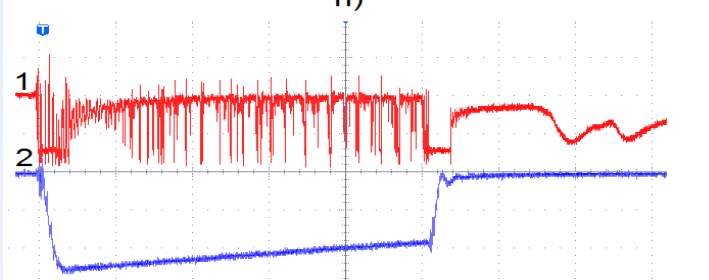
f)



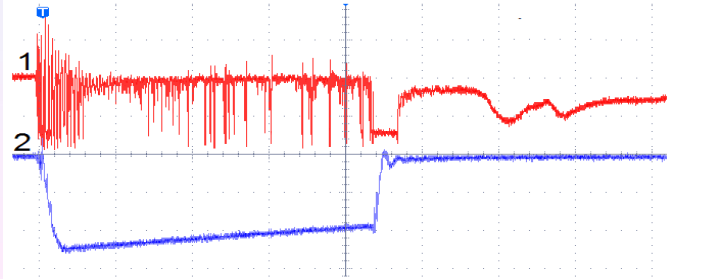
g)



h)



i)



j)

Podsumowanie - Wnioski

1) Estry syntetyczne i naturalne w zakresie ich parametrów dielektrycznych stanowią interesującą alternatywę dla olejów mineralnych stosowanych w transformatorach. Wydaje się, że rozwój aplikacji z estrami będzie nadal postępował w ciągu najbliższych lat, co widać we wzroście liczby jednostek napełnianych tymi płynami jak również we wzroście liczby produktów dostępnych na rynku dla producentów transformatorów.

2) W aspekcie wytrzymałości udarowej estrów, który to temat został przedstawiony nieco szerzej w niniejszym artykule, trudno jednoznacznie stwierdzić czy estry posiadają gorsze właściwości w tym zakresie. Zaobserwowane różnice pomiędzy nimi a olejem mineralnym są minimalne.

Porównując natomiast same estry można wnioskować, że wszystkie płyny wykazują podobne właściwości przy narażeniach natury udarowej i mogą być z powodzeniem stosowane w tym samym zakresie w aplikacjach wysokonapięciowych, jeśli weźmiemy pod uwagę udarowe napięcie przebicia jako oceniany parametr.

3) Należy jednak podkreślić, że estry, jako wciąż nowe produkty na rynku transformatorowym, wymagają ciągłych badań, nie tylko w odniesieniu do ich właściwości dielektrycznych.



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ