



Politechnika Lubelska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN  
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A  
[www.kueitwn.pollub.pl](http://www.kueitwn.pollub.pl)

---

## **LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ**

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 2**

Porównanie wytrzymałości dielektrycznej  
cieczy i gazów

## 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest:

- określanie wpływu odległości międzyelektrodowej na wytrzymałość powietrza,
- określanie wpływu odległości międzyelektrodowej na wytrzymałość oleju izolacyjnego,
- porównanie wytrzymałości dielektrycznej powietrza i oleju izolacyjnego.

## 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

W układach wysokiego napięcia często spotykanymi dielektrykami są powietrze oraz oleje izolacyjne. Powietrze jest naturalnym dielektrykiem, w którym pracują prawie wszystkie urządzenia elektroenergetyczne. Oleje stanowią od lat podstawowy materiał izolacyjny urządzeń elektroenergetycznych - transformatorów, wyłączników, kabli i kondensatorów. Przy przekroczeniu pewnej wartości napięcia, wartość którego zależy od kształtu elementów, znajdujących się pod napięciem, rodzaju dielektryka, izolującego te elementy, temperatury, ciśnienia, wilgotności oraz biegunowości napięcia w układzie dochodzi do przeskoku. Zachodzi więc potrzeba dokładnej znajomości mechanizmów wyładowania oraz wytrzymałości dielektrycznej wspomnianych dielektryków, gdyż od tych czynników uzależniona jest bezawaryjna praca urządzeń elektroenergetycznych. Miarą odporności materiałów dielektrycznych na przebicia jest ich wytrzymałość dielektryczna. Jest to najmniejsza wartość natężenia pola elektrycznego, po osiągnięciu której dochodzi do przeskoku.

### 2.1. WYTRZYMAŁOŚĆ DIELEKTRYCZNA POWIETRZA

#### 2.1.1. Mechanizmy wyładowań

##### Mechanizm Townsenda

Powietrze jest gazem, składającym się z obojętnych cząsteczek azotu, tlenu, tlenku węgla i szeregu innych. Żeby powietrze zaczęło przewodzić prąd elektryczny, powinna w nim powstać duża liczba swobodnych elektronów i jonów. Powoduje to zjawisko tzw. wyładowania. W przypadku wyładowań w gazach duże znaczenie ma elektronowa jonizacja zderzeniowa. Występuje ona w polu elektrycznym o dużym natężeniu, np. dla powietrza atmosferycznego przy 30 kV/cm. Do jonizacji zderzeniowej dochodzi w sposób następujący. Pierwszy elektron, który zazwyczaj powstaje pod wpływem promieniowania kosmicznego, jonizuje pierwszą cząsteczkę gazu. Pod wpływem pola elektrycznego zostaje on przyspieszony i pozyskuje energię kinetyczną. W polu o dużym natężeniu jego energia może przekroczyć energię, potrzebną do jonizacji obojętnych cząsteczek gazu. Zderzając się z taką cząsteczką elektron wybije z niej elektron z powłoki walencyjnej. W taki sposób powstaną dodatni jon i drugi elektron swobodny. Dalej biegą już dwa elektrony i biorą udział w dalszych zderzeniach, w wyniku których liczba

swobodnych elektronów wzrasta lawinowo. Obszar zjonizowanego gazu nazywamy lawiną elektronową. Townsend wyjaśnił, że lawina elektronowa wskutek zjawisk dodatkowych może być przyczyną powstawania nowych lawin poza lawiną pierwotną. Lawiny wtórne powstają w większej odległości od anody. Elektrony dają początek nowym lawinom elektronowym i w ten sposób wyładowanie rozwija się w samodzielnie. Natężenie prądu rośnie, aż do wystąpienia warunków zwarciovych. Stan, w którym o liczbie elektronów decyduje jonizacja zderzeniowa nazywamy wyładowaniem samodzielnym.

Mechanizm Townsenda występuje tylko przy niezbyt wielkich iloczynach ciśnienia gazu  $p$  i odległości między elektrodami  $a$ . Wyładowanie Townsenda zachodzi dla iloczynu  $p \cdot a$  w granicach  $26 \div 133 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$ , co w warunkach atmosferycznych odpowiada odstępowi międzyelektrodowemu rzędu 1 cm. Przy większych odległościach przeskoczenie następuje przy napięciach trochę niższych niż wynikałoby to z obliczeń dokonanych wg teorii Townsenda, mamy bowiem wówczas do czynienia z innym mechanizmem wyładowania, a mianowicie z tzw. mechanizmem kanałowym.

#### Mechanizm kanałowy

Przy większych wartościach iloczynu  $p \cdot a$  lawina elektronowa zapoczątkowana przy katodzie nie dochodzi do anody. Obecność lawiny w przerwie międzyelektrodowej powoduje odkształcenie zewnętrznego pola elektrycznego, co umożliwia powstawanie nowych lawin w miejscach, gdzie natężenie pola osiągnęło wartość krytyczną. Łączące się lawiny tworzą między elektrodami kanał zwany strimerem o stosunkowo dużej rezystancji. Wyładowaniu w kanale towarzyszy jonizacja termiczna i wówczas kanał staje się silnie przewodzący. Kanał taki nazywamy liderem. W praktycznych układach najczęściej występuje kanałowy mechanizm wyładowania, gdyż odstęp między elektrodami przekraczają wartość 1 cm. Przy ciśnieniu atmosferycznym i spotykanych w praktyce temperaturach odległość ta stanowi granicę rozdzielającą oba mechanizmy wyładowania: Townsenda i kanałowy.

W przypadku danego ćwiczenia laboratoryjnego odległość międzyelektrodowa zmieniana będzie od 0,5 do 5 cm. W tym zakresie zmian odległości wystąpią dwa opisane wyżej mechanizmy wyładowania.

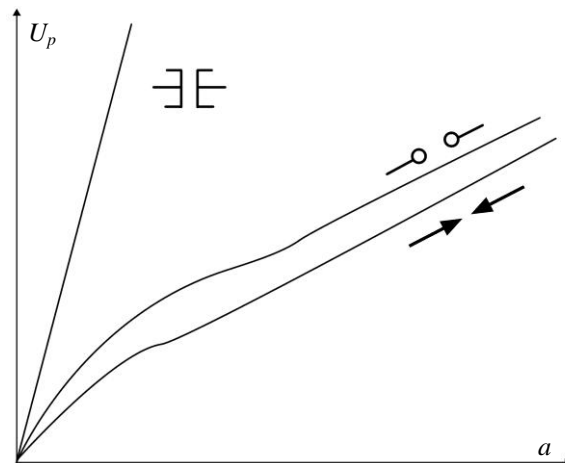
#### **2.1.2. Czynniki wpływające na wytrzymałość powietrza**

Wytrzymałość dielektryczna powietrza zależy od:

- kształtu i odstępu elektrod,
- ciśnienia atmosferycznego,
- temperatury otaczającego powietrza.

Układy z polem umiarkowanie nierównomiernym (układ kulowy), mają wytrzymałość pośrednią pomiędzy układami równomiernym (układ płaski) i nierównomiernym (układ ostrzowy).

Wartość napięcia przeskoku  $U_p$  dla tych trzech układów elektrod zmienia się w sposób przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność napięcia przeskoku  $U_p$  od odległości  $a$  między elektrodami dla układu płaskiego, kulowego i ostrzowego

Wytrzymałość powietrza w dowolnym układzie elektrod jest funkcją ciśnienia i temperatury. Wraz ze wzrostem ciśnienia maleją odległości między cząsteczkami powietrza, a więc maleje i średnia droga swobodna elektronu, na której elektron poruszając się w polu elektrycznym zyskuje energię kinetyczną. Warunkiem występowania jonizacji zderzeniowej jest uzyskanie przez elektron od pola elektrycznego energii, większej od energii jonizacji cząsteczek gazu. W celu spowodowania przeskoku należy więc zwiększyć wartość napięcia przyłożonego do układu elektrod ponad napięcie jonizacji.

Wzrost temperatury powietrza pociąga za sobą zmniejszenie napięcia przeskoku, ponieważ gęstość powietrza maleje. Jeżeli przez  $U_{pn}$  oznaczymy napięcie przeskoku w warunkach normalnych (ciśnienie  $p = 1013$  hPa, temperatura powietrza  $T = 20^\circ\text{C}$  i wilgotność bezwzględna  $w_n = 11 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ), to napięcie przeskoku  $U_p$  dla ciśnienia  $p$  i temperatury  $T$  można obliczyć z zależności:

$$U_p = U_{pn} \cdot \delta, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{p}{1013} \cdot \frac{273+20}{273+T}, \quad (2)$$

gdzie:  $\delta$  - gęstość względna powietrza.

Wilgotność powietrza ma istotny wpływ na napięcie przeskoku w układach o silnie nierównomiernym polu elektrycznym. Dla tych układów należy zamiast wzoru (1) stosować wzór:

$$U_p = U_{pn} \cdot \delta \cdot k_w, \quad (3)$$

gdzie:  $\delta$  - gęstość względna powietrza określona wzorem (2),

$$k_w \cong 1 + (w - 11) \cdot 0,012, \quad (4)$$

gdzie:  $k_w$  - współczynnik poprawkowy, w którym  $w$  jest wilgotnością bezwzględna powietrza, wyrażoną w  $\frac{g}{m^3}$ .

W polu równomiernym lub umiarkowanie nierównomiernym (układ kulowy) wpływ wilgotności jest znikomy - często pomijalny.

## 2.2. WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA OLEJU

### 2.2.1. Rodzaje olejów izolacyjnych

Oleje izolacyjne można podzielić w zależności od ich pochodzenia na:

- oleje mineralne,
- oleje syntetyczne.

Oleje mineralne są produktami destylacji ropy naftowej. Ropa naftowa, z której otrzymuje się oleje mineralne, jest głównie mieszaniną węglowodorów nasyconych parafinowych o wzorze ogólnym  $C_nH_{2n+2}$ , nasyconych węglowodorów naftenowych  $C_{2n}H_{2n}$  oraz nienasyconych węglowodorów aromatycznych  $C_nH_n$ ,  $C_nH_{n-2}$ . Ropa naftowa, wydobywana z różnych źródeł, różni się składem (zawartością węglowodorów). Decyduje to o podziale na ropy: parafinowe, mieszane i naftenowe.

Oleje izolacyjne mogą być wytwarzane ze wszystkich trzech rodzajów ropy. Najłatwiej i najtaniej uzyskuje się dobrej jakości oleje izolacyjne z ropy naftenowych. Olej mineralny wyprodukowany z ropy naftenowej charakteryzuje się dobrymi właściwościami elektroizolacyjnymi i niską temperaturą krzepnięcia. Wzrost zawartości węglowodorów parafinowych w oleju powoduje podwyższenie jego temperatury krzepnięcia oraz wzrost kwasowości podczas utleniania się (starzenia). Z tego względu w procesie wytwarzania olejów mineralnych z ropy parafinowych dokonuje się podczas rafinacji ropy głębokiego odparafinowania, dodaje się do olejów specjalne związki chemiczne zwane depresatorami lub stosuje się łącznie obydwa te środki.

Trzeci podstawowy składnik mineralnych olejów izolacyjnych stanowią węglowodory aromatyczne. Węglowodory te wpływają negatywnie na odporność oleju na utlenianie, mają natomiast pozytywny wpływ na gazowe właściwości oleju (absorpcja gazu w silnym polu elektrycznym) i na wytrzymałość elektryczną. Oleje zawierające węglowodory aromatyczne w ilościach mniejszych od optymalnych, mają skłonność do szybkiego wytwarzania kwasów organicznych. Oleje o większej od optymalnej zawartości węglowodorów aromatycznych wykazują w czasie eksploatacji gwałtowny wzrost substancji asfaltowo-żywicznych. Dlatego ilość węglowodorów aromatycznych musi być starannie dobierana.

Oleje mineralne mają szerokie zastosowania jako materiały elektroizolacyjne, nasycające, chłodzące i gaszące łuk elektryczny. Duże rozpowszechnienie olejów mineralnych wynika z następujących zalet:

- duża wytrzymałość dielektryczna przy napięciu przemiennym (największe osiągalne natężenie przebicia dochodzi nawet do 30 kV/mm) i jeszcze większa przy napięciu udarowym,
- mała stratność dielektryczna (przy napięciu przemiennym  $\text{tg}\delta = 0,003 \div 0,005$ ),
- nieduża konduktywność (dla olejów technicznie czystych  $\gamma = 10^{-11} \div 10^{-13}$  S/m),
- duża płynność, pozwalająca na przesycanie włóknistej izolacji stałej i jej ochronę przed wilgocią,
- duża zdolność do efektywnego oddawania ciepła oraz do gaszenia łuku elektrycznego.

Oleje mineralne posiadają również liczne wady, a w szczególności:

- niedużą odporność na utlenianie,
- stosunkowo niską temperaturę zapłonu par oleju,
- tendencje do rozkładu chemicznego i wydzielania gazów oraz wynikająca stąd możliwość wybuchu (w mieszaninie z powietrzem),
- stosunkowo duży współczynnik rozszerzalności cieplnej (w temperaturze 20°C rzędu  $0,0007 \div 0,001$  1/K), co powoduje konieczność stosowania zbiorników kompensacyjnych.

Oleje syntetyczne są to produkty ściśle kontrolowanej syntezy chemicznej, o dokładnie znanym składzie chemicznym. W przeciwieństwie do olejów mineralnych oleje syntetyczne są łatwiej odtwarzalne, a ich własności są powtarzalne nawet w produkcji różnych wytwórni.

Do najczęściej stosowanych olejów syntetycznych należały do niedawna chlorowane dwufenyle  $\text{C}_6\text{H}_2\text{Cl}_3$  i  $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_2$ . Oleje te w porównaniu z olejami mineralnymi wykazują korzystniejsze właściwości, którymi są niepalność, niewybuchowość, wyższa odporność cieplna, brak wytrącania osadu jako produktu starzenia, niezmiennosc lepkości i kwasowości podczas eksploatacji i ponad 2-krotnie większa przenikalność elektryczna. Chlorowane dwufenyle posiadają również wady, m.in.: dużą zmienność własności dielektrycznych w zależności od temperatury, wrażliwość na zanieczyszczenia oraz szkodliwe oddziaływanie na zdrowie człowieka i środowisko. Oleje te są niebezpieczne dla środowiska ze względu na ich toksyczność, bardzo trudną biodegradowalność i związaną z tym możliwość kumulacji w organizmach żywych. Z tego względu stosowanie chlorowanych dwufenyli w energetyce ogranicza się do tych urządzeń, których eksploatacja, a także późniejsze ich złomowanie, są w odpowiedni sposób kontrolowane.

Coraz częstsze zastosowanie zaczynają znajdować syntetyczne oleje na bazie węglowodorów aromatycznych (alkilobenzeny, alkilodwufenyloetany, alkilonaftaleny). Oleje te wykazują: dobre właściwości gazowe (silna absorpcja gazu w polu elektrycznym), małą wartość współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  (rzędu  $10^{-4}$  przy 50 Hz i w temperaturze  $20 \div 90^\circ\text{C}$ ) małą lepkość i dobrą zwilżalność

materiałów elektroizolacyjnych. Niedogodnością tych olejów jest mała przenikalność elektryczna ( $\epsilon$  nie przekracza wartości 2,6).

Zdecydowanie większą przenikalność posiadają oleje estrowe ( $\epsilon = 3 \div 6$ ). Odznaczają się także wysoką odpornością na działanie temperatury, wysoką temperaturą wrzenia, niską temperaturą krzepnięcia i małą lepkością w niskich temperaturach. Oleje estrowe są cieczami ognioodpornymi. Ujemną stroną olejów estrowych jest duża wartość  $\text{tg}\delta$  (przy 50 Hz w temperaturze 90°C wartość  $\text{tg}\delta = 0,01 \div 0,1$ ) oraz higroskopijność.

Do rzadziej stosowanych należą oleje silikonowe. Oleje te charakteryzują się wysoką dopuszczalną temperaturą pracy (do 180°C), dobrą odpornością na utlenianie i dobrymi właściwościami w niskich temperaturach (temperatura krzepnięcia wynosi ok. - 85°C). Wytrzymałość dielektryczna olejów silikonowych jest mniejsza niż olejów mineralnych. W zakresie temperatur dodatnich wykazują dużą chłonność wody.

Obecnie wprowadzane są oleje syntetyczne z grupy węglowodorów aromatycznych, będące mieszaninami benzylu i dibenzylotoluenu. Te nowe ciekłe węglowodory aromatyczne mają bardzo dobre właściwości elektroizolacyjne. Są to ciecze o wyjątkowo dobrych właściwościach gazowych (silna absorpcja gazu w polu elektrycznym).

Niedawno powstał nowy olej syntetyczny o nazwie EXP-7, który przeznaczony jest dla transformatorów wysokiego napięcia. Ten nowy olej ma większą wytrzymałość dielektryczną od oleju mineralnego, a także porównywalne lub lepsze właściwości fizyczno-chemiczne. Olej EXP-7 nie zawiera, w przeciwieństwie do niektórych olejów mineralnych, rakotwórczych pocyklicznych węglowodorów aromatycznych.

Zastępowanie olejów mineralnych nowymi olejami syntetycznymi z grupy węglowodorów aromatycznych jest jeszcze ograniczone ze względu na ich wysoką cenę.

### **2.2.2. Mechanizmy przebicia olejów izolacyjnych**

Mechanizmy przebicia olejów izolacyjnych są znacznie słabiej poznane niż mechanizmy przeskoku w gazach. Ma na to wpływ różnorodna i skomplikowana struktura olejów. Bardzo poważnym utrudnieniem w poznaniu mechanizmów przebicia oleju są zanieczyszczenia (wilgoć, pęcherzyki gazowe, cząstki stałe, jak np.: włókienka celulozy, sadza, kurz, cząstki metali, itp.).

Istnieje wiele modeli dotyczących mechanizmów przebicia olejów, które można podzielić na trzy grupy:

- elektronowe modele przebicia - dotyczące olejów o bardzo dużym stopniu czystości i nie uwzględniające wpływu zanieczyszczeń,
- pęcherzykowe modele przebicia - dotyczące olejów technicznie czystych, ale niezbyt dobrze odgazowanych,

- mostkowe modele przebicia - dotyczące olejów silnie zanieczyszczonych.

Elektronowy model przyjmuje, że wyładowanie w czystym oleju polega na takim samym rozwoju lawiny elektronowej, jak w przypadku dielektryka gazowego. Elektrony początkujące wyładowanie w oleju powstają wskutek ich autoemisji z katody, szczególnie w miejscach lokalnych nierówności jej powierzchni. Następnie elektron doznaje przyspieszenia pod wpływem pola i zderza się elastycznie z jej cząsteczkami. Stopniowo zwiększa swoją energię aż do poziomu wystarczającego do wywołania zderzenia jonizacyjnego, które zapoczątkuje lawinę.

Warunek wystąpienia elektronowej jonizacji cząsteczek cieczy w polu elektrycznym może być zapisany w następującej postaci:

$$e \cdot E \cdot \lambda > C \cdot hv, \quad (5)$$

gdzie:  $e$  - ładunek elektronu,  $E$  - natężenie pola elektrycznego,  $\lambda$  - średnia droga swobodna elektronu w cieczy,  $hv$  - kwant energii potrzebnej do zjonizowania cząsteczki cieczy,  $C$  - stała uwzględniająca odległości międzycząsteczkowe, liczbę atomów w cząsteczce, liczbę Avogadro, ładunek elektronu oraz masę i gęstość cieczy.

Badania wykazują, że wraz ze wzrostem ciśnienia wytrzymałość oleju wyraźnie rośnie. Tej zależności elektronowe teorie nie mogą wytłumaczyć. W cieczach, które są praktycznie nieściśliwe wzrost ciśnienia nie może spowodować zmniejszenia drogi swobodnej elektronów. Wobec powyższego zgodnie z elektronowymi teoriami nie powinna rosnać wytrzymałość cieczy. Ta istotna sprzeczność z wynikami eksperymentalnymi podważa słuszność elektronowych teorii przebicia.

W pęcherzykowych teoriach zakłada się, że wyładowania są zapoczątkowane wewnątrz pęcherzyków gazowych. Pęcherzyki gazowe powstają nie tylko w olejach słabo odgazowanych, ale również w olejach technicznie czystych, gdzie obecność pęcherzyków gazowych spowodowana jest lokalnym parowaniem cieczy wokół mikroostrzy na powierzchni katody.

Obecność pęcherzyków powoduje obniżenie wytrzymałości dielektrycznej olejów z dwóch powodów. Po pierwsze, natężenie pola elektrycznego wewnątrz pęcherzyków gazowych jest większe niż w cieczy (wskutek mniejszej przenikalności dielektrycznej gazu). Po drugie, wytrzymałość dielektryczna gazów jest mniejsza, niż cieczy.

W momencie wyładowania pęcherzyk chwilowo przechodzi w stan przewodzący. Jeżeli pęcherzyk był przyklejony do powierzchni elektrody, pojawia się na niej mikroostrze, na końcu którego kumuluje się pole elektryczne. Doprowadza to do przejścia od stanu jednorodnego pola elektrycznego do stanu niejednorodnego, a tym samym obniża się wytrzymałość dielektryczna oleju.



Wartość natężenia pola potrzebnego do wywołania wyładowań w pęcherzyku zależy od jego wymiarów, temperatury i ciśnienia gazu. Badania eksperymentalne wykazały, że podczas zwiększania natężenia pola stopień wydłużenia pęcherzyków rośnie nieznacznie i nawet w momentach bliskich przebiciu nie daje się zauważyć ich wydłużenia. Charakterystyczne jest także osadzanie się pęcherzyków na elektrodach.

Pęcherzyk gazowy już istniejący w oleju, staje się miejscem zapoczątkowania jonizacji przy natężeniu pola  $E_0$  o wartości:

$$E_0 = E' \frac{(3 \cdot \epsilon_1)}{1 + 2\epsilon_1}, \quad (6)$$

gdzie:  $E'$  - natężenie pola w przestrzeni międzyelektrodowej przy założeniu, że dielektryk jest jednorodny (bez pęcherzyka gazowego),  $\epsilon_1$  - przenikalność elektryczna względna oleju.

W związku z tym, że wytrzymałość dielektryczna powietrza wynosi ok. 3 kV/mm, a olejów ok. 30 kV/mm, ze wzoru (6) wynika, że wytrzymałość oleju z pęcherzykami powietrza może obniżyć się.

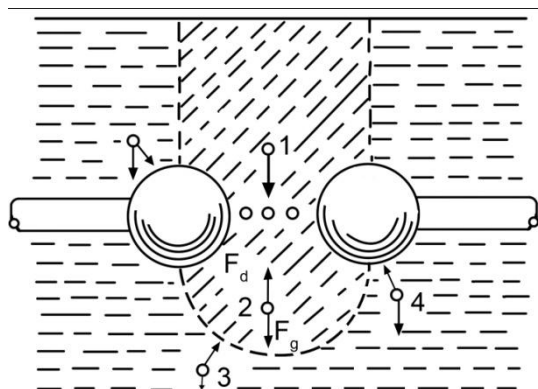
Mechanizm mostkowy wiąże się z obecnością w oleju zanieczyszczeń takich jak włókna i cząsteczki materiałów stałych, które w polu elektrycznym polaryzują się. Na spolaryzowaną cząstkę kulistą o promieniu  $r$  i przenikalności elektrycznej  $\epsilon_2$  działa siła:

$$F_d = \frac{|\epsilon_2 - \epsilon_1|}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} E \cdot r^3 \text{grad} E, \quad (7)$$

która ustawia ją wzdłuż linii sił.

Ze wzoru (7) widać, że pod wpływem siły  $F_d$  cząstki zanieczyszczeń o przenikalności większej od przenikalności oleju ( $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ) będą przemieszczać się do miejsc o większych natężeniach pola. Cząstki o przenikalności mniejszej od przenikalności oleju ( $\epsilon_2 < \epsilon_1$ ) będą wypierane z obszaru silnego pola.

Według Skowrońskiego dla każdego kształtu i układu elektrod występuje pewien tzw. obszar wymiatania, z którego cząstki zanieczyszczeń są wciągane w przestrzeń międzyelektrodową. Na rysunku 2 przedstawiono obszar wymiatania dla elektrod kulowych. Cząstki 1 i 2 znajdują się w obszarze wymiatania. Dla cząstki 1 siły elektrostatyczne  $F_d$  są skierowane zgodnie z siłami grawitacyjnymi  $F_g$ , natomiast dla cząstki 2 są skierowane przeciwnie ( $F_d > F_g$ ). Cząstki 3, 4 znajdują się poza obszarem wymiatania. Dla cząstek tych  $F_g > F_d$ .



Rys. 2. Obszar wymiatania iskiernika kulowego.  $F_d$  i  $F_g$  - siły elektrostatyczne i grawitacyjne działające na cząstkę zanieczyszczeń

Wciąganie zanieczyszczeń z obszaru wymiatania w przestrzeń międzyelektrodową powoduje stopniowe zwiększenie koncentracji cząstek w tej przestrzeni. Cząsteczki poruszają się między elektrodami, przy czym część z nich osiada na elektrodach. Przyklejenie się pierwszej cząsteczki do elektrody powoduje powstanie niejednorodności pola elektrycznego na końcu cząsteczki. Ułatwia to doczepianie się do niej kolejnej cząsteczki itd. W taki sposób powstaje mostek, zwiększający niejednorodność pola elektrycznego, co obniża wytrzymałość dielektryczną oleju.

Przebicie oleju następuje wskutek nagrzewania się mostka podczas przepływu prądu (mostek jest bardziej przewodzący niż olej izolacyjny). Przebicie oleju może również wystąpić podczas formowania się mostka ze względu na duże natężenie pola występujące przed czołem mostka.

Czynnikiem sprzyjającym mechanizmowi mostkowemu jest zawilgocenie oleju, które ze względu na dużą przenikalność dielektryczną i stosunkowo wysoką przewodność wody powoduje wzrost przenikalności i oraz przewodności zanieczyszczeń.

### 2.2.3. Wpływ różnych czynników na wytrzymałość oleju

Na wytrzymałość olejów ma wpływ wiele czynników. Do najważniejszych należą: zawartość wilgoci i zanieczyszczeń, czas przyłożenia napięcia, odstęp i powierzchnia elektrod, kształt pola elektrycznego, temperatura i ciśnienie.

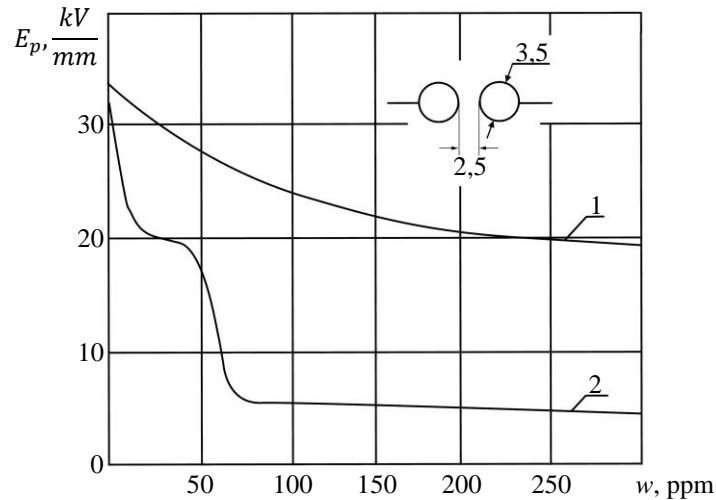
#### Wpływ wilgoci i zanieczyszczeń

W oleju izolacyjnym woda może występować w postaci rozpuszczonej i emulsyjnej. Woda zmniejsza wytrzymałość olejów w układach o polu prawie równomiernym i odstępach mniejszych od 10 mm (rys. 3).

Wpływ zawilgocenia jest szczególnie silny, gdy olej zawiera również higroskopijne zanieczyszczenia, jak np. włókna celulozy, a woda występuje w postaci emulsyjnej (ok. 10 ÷ 60 ppm, gdzie: 1 ppm - jedna jednostka wagowa wody na milion jednostek wagowych oleju). Przy dalszym wzroście zawilgocenia (powyżej 60 ppm) wytrzymałość oleju maleje nieznacznie (rysunek 3, krzywa 2).

Zjawisko to można tłumaczyć tym, że przy większych zawilgoceniach woda nie utrzymuje się w oleju, lecz opada na dno zbiornika.

Wpływ wilgoci i innych zanieczyszczeń jest niewielki, gdy czas działania napięcia jest krótki (napięcie udarowe), nawet jeśli odstęp elektrod są małe.

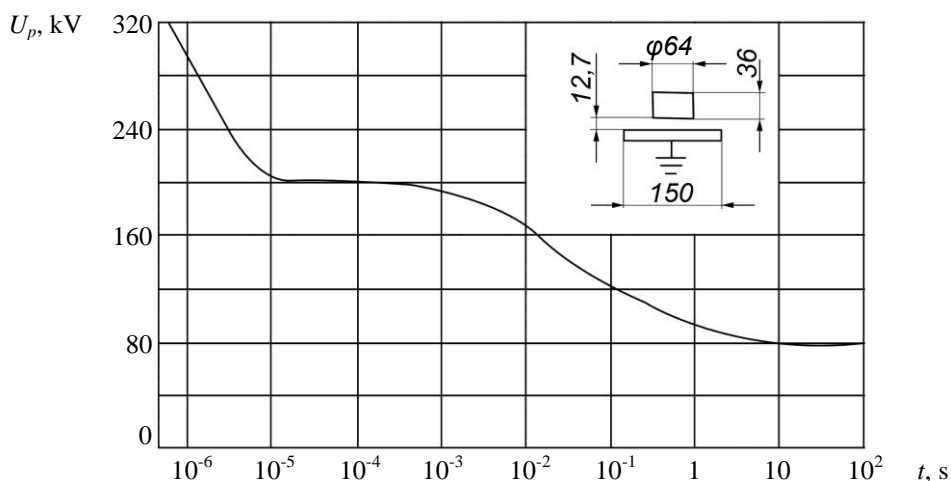


Rys. 3. Wpływ zawartości wody i zawiesin włóknistych na wytrzymałość oleju mineralnego, badanego napięciem przemiennym 50 Hz w temperaturze 20°C za pomocą symetrycznego iskiernika kulowego;  $E_p$  - natężenie przebicia oleju, 1 - olej dobrze oczyszczony (praktycznie pozbawiony włókien i innych zanieczyszczeń), 2 – olej miernie oczyszczony (zawierający włókna celulozy)

### Wpływ czasu działania napięcia

Napięcie przebicia oleju izolacyjnego wzrasta, jeżeli stosujemy coraz krótsze czasy przyłożenia napięcia poniżej 1 min. Wpływ tego czasu na wytrzymałość w znacznym stopniu zależy od czystości oleju. Im czystszy jest olej, tym wpływ ten jest mniejszy.

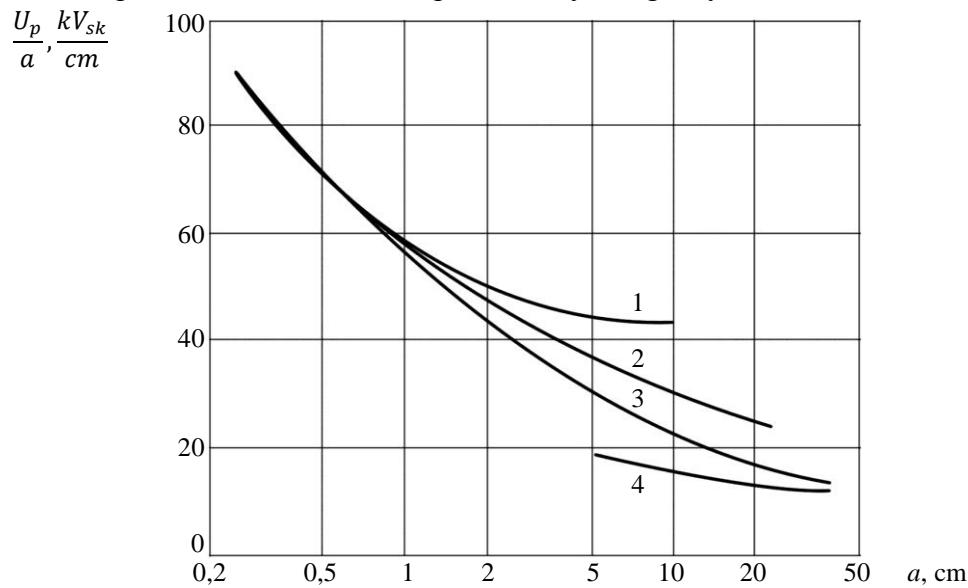
Charakterystyczną krzywą zależności napięcia przebicia  $U_p$  oleju od czasu przyłożenia napięcia  $t$  przedstawia rysunek 4. Zmniejszenie się napięcia przebicia dla czasów  $t$  większych niż  $10^{-3}$  s jest związane z rosnącym stopniowo wpływem zanieczyszczeń na przebicie oleju. Dla tych czasów istnieje duże prawdopodobieństwo utworzenia się mostka zanieczyszczeń.



Rys. 4. Zależność napięcia przebicia oleju transformatorowego od czasu działania napięcia

Wpływ kształtu, powierzchni i odstępów elektrod

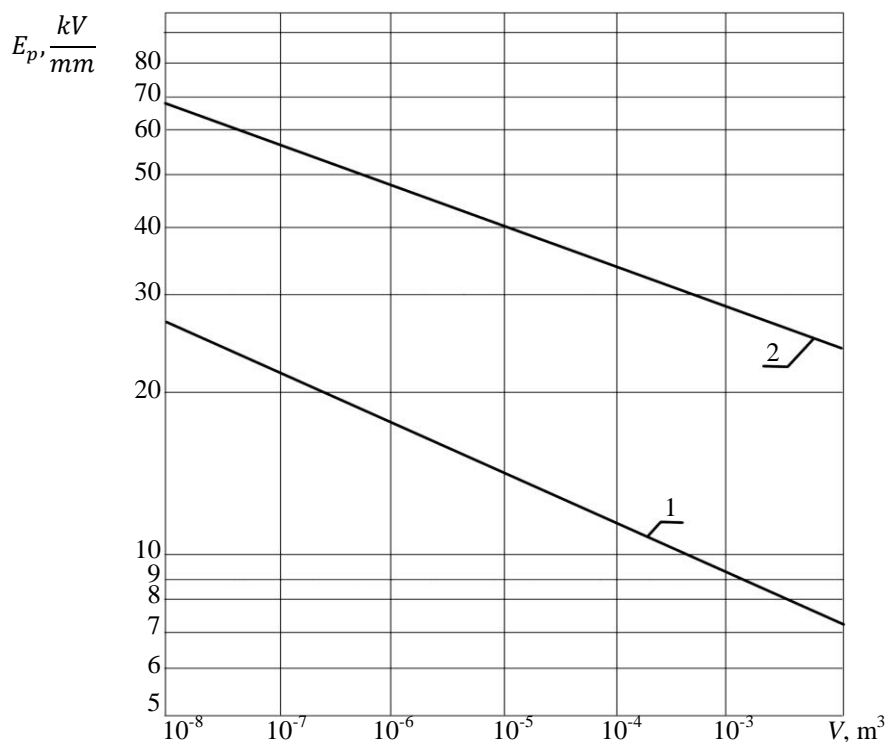
Wytrzymałość elektryczna oleju izolacyjnego maleje wraz ze wzrostem odstępów elektrod oraz zwiększeniem stopnia nierównomierności pola elektrycznego (rys. 5).



Rys. 5. Zależność średniego natężenia przebicia  $E_p$  dla technicznie czystego oleju od drogi przebicia  $a$ . Temperatura 14°C, częstotliwość 50 Hz; 1 - układ płytowy, 2 - układ kul o średnicy 10 cm, 3 - układ kul o średnicy 2,5 cm, 4 - układ ostrzowy

Im bardziej nierównomierne jest pole elektryczne, tym wytrzymałość oleju okazuje się mniejsza. W polu elektrycznym równomiernym wytrzymałość oleju technicznie czystego jest tym większa, im mniejszy jest odstęp elektrod. Szczególnie ma to miejsce, gdy odstęp elektrod nie przekracza kilku milimetrów. Zjawisko to zanika w miarę wzrostu czystości oleju, ponieważ wyładowania powstają wtedy głównie wskutek procesów przyelektrodowych.

W przeciwieństwie do gazów nawet w najczystszym oleju, zwiększenie odstępów międzyelektrodowego w polu prawie równomiernym prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości oleju. Jest to tzw. zjawisko rozmiarowe (objętościowe). Polega ono na tym, że wytrzymałość oleju mierzona przy stałym odstępnie elektrod maleje wraz ze zwiększeniem powierzchni elektrod. Wytrzymałość oleju maleje również wraz ze zwiększeniem odstępów elektrod przy stałej ich powierzchni. Wynika więc z tego, że natężenie przebicia zależy od objętości oleju zawartego w przestrzeni międzyelektrodowej (rys. 6).



Rys. 6. Zależność natężenia przebicia oleju transformatorowego w układzie elektrod płaskich od objętości silnie naprężanego oleju; 1 - napięcie przemienne 50 Hz, 2 - napięcie udarowe piorunowe 1,2/50  $\mu s$

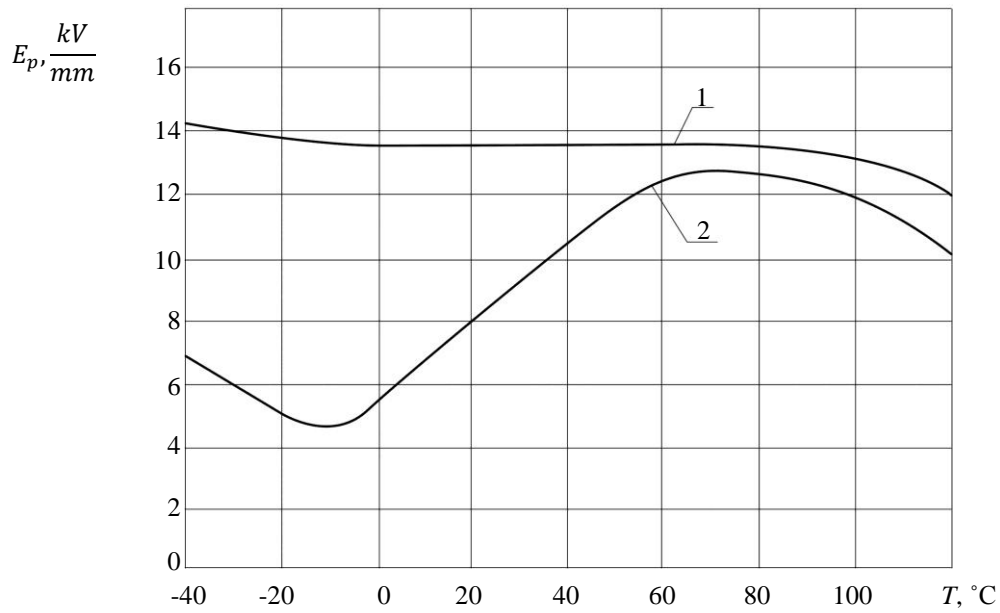
Zjawisko rozmiarowe jest związane z występowaniem słabych miejsc (zanieczyszczeń) w przestrzeni międzyelektrodowej, których liczba rośnie wraz ze zwiększeniem objętości oleju.

#### Wpływ temperatury i ciśnienia

Wpływ temperatury i ciśnienia na wytrzymałość elektryczną olejów ma dość złożony charakter. Dużą rolę odgrywają tutaj zanieczyszczenia oleju szczególnie w postaci wody i pęcherzyków gazowych.

Wytrzymałość elektryczna oleju technicznie czystego i dobrze odwodnionego nie zależy praktycznie od temperatury w przedziale  $0 \div 80^\circ C$  (rysunek 7, krzywa 1). W oleju zawilgoconym i niezbyt dobrze oczyszczonym z zawiesin włóknistych uwidacznia się wyraźny wpływ temperatury (rysunek 7, krzywa 2).

Przy obniżeniu temperatury poniżej  $0^\circ C$  widać wzrost wytrzymałości oleju. Dla temperatur poniżej  $0^\circ C$  woda emulsyjna, znajdująca się w oleju, ulega zestaleniu tworząc cząstki lodu. Dla tych temperatur wzrasta lepkość oleju, która utrudnia przemieszczanie się cząstek lodu i innych zanieczyszczeń w polu elektrycznym. Dlatego obniżenie temperatury powoduje zwiększenie wytrzymałości oleju.

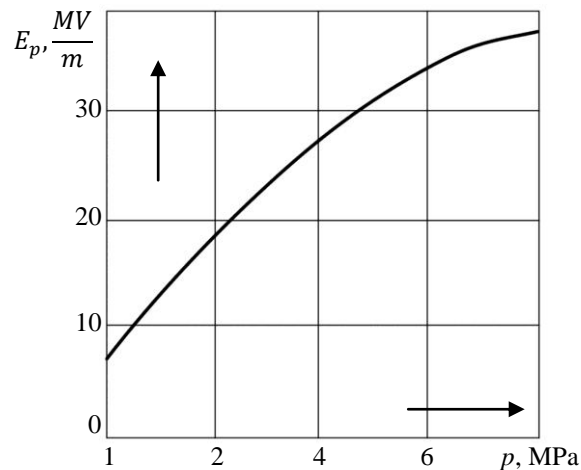


Rys. 7. Wpływ temperatury na natężenie przebicia technicznie czystego oleju w polu elektrycznym praktycznie równomiernym, 1 - olej pozbawiony wody, 2 - olej zawilgocony

Wzrost wytrzymałości oleju w zakresie temperatur od 0°C do ok. 80°C jest związany z przechodzeniem wody emulsyjnej w wodę rozpuszczoną. Woda rozpuszczona wywiera o wiele mniej niekorzystny wpływ na wytrzymałość oleju.

Powyżej temperatury ok. 80°C wytrzymałość oleju maleje na skutek intensywniejszego parowania wody i tworzenia się pęcherzyków gazu.

Zależność wytrzymałości technicznie czystego oleju od ciśnienia pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność natężenia przebicia oleju transformatorowego od ciśnienia w polu umiarkowanie nierównomiernym

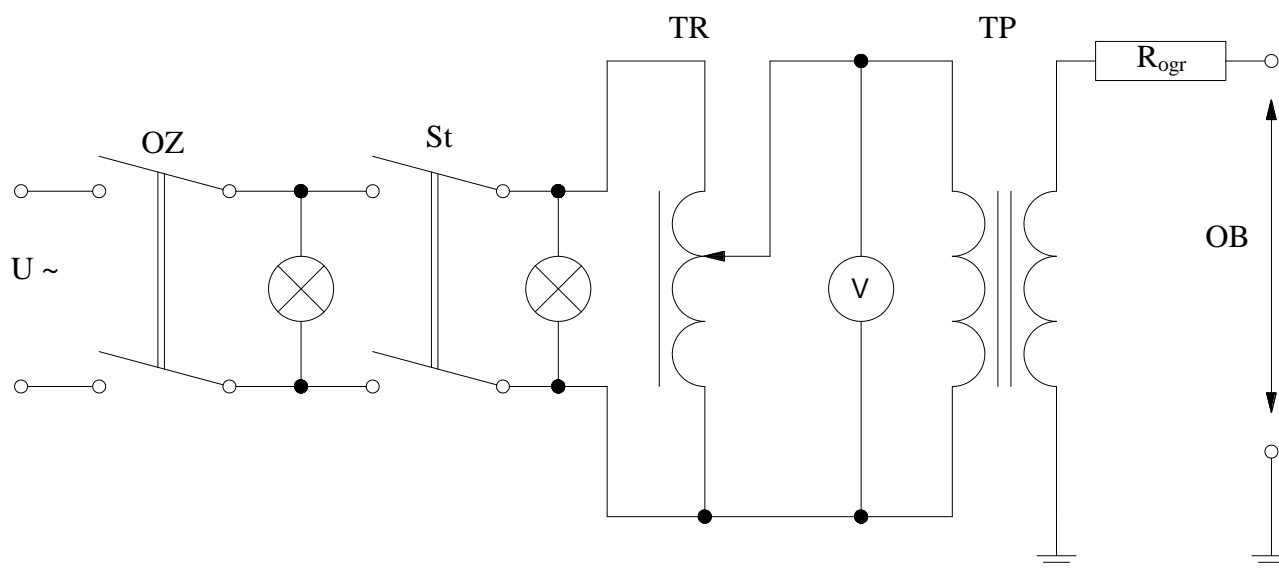
### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

- wyznaczyć zależność napięcia przebicia powietrza od odległości międzyelektrodowej dla układu kulowego,
- wyznaczyć zależność napięcia przebicia oleju izolacyjnego od odległości międzyelektrodowej dla układu kulistego.

#### 3.1. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

##### 3.1.1. Pomiary napięcia przeskoku w powietrzu

Schemat elektryczny układu pomiarowego do badań wytrzymałości elektrycznej powietrza w zależności od odległości międzyelektrodowej pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Układ pomiarowy

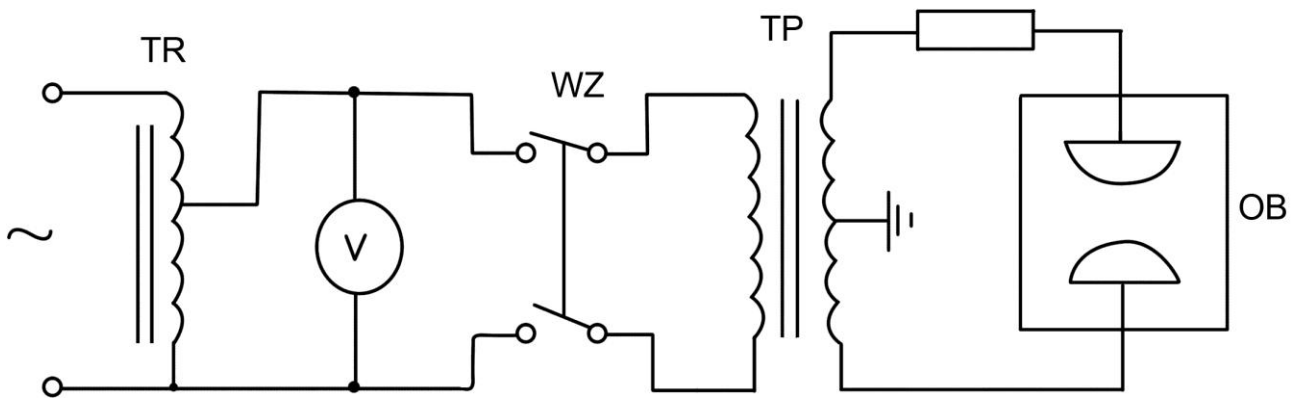
Pomiary należy przeprowadzić w układzie elektrod kulowych o średnicy 12,5 cm dla odstępów w granicach od 5 do 50 mm, zmieniając odstęp co 5 mm. Po nastawieniu żądanego odstępów iskiernika kulowego podnosimy napięcie ze stałą szybkością (1..2 kV/s) aż do przebicia.

Dla każdego odstępów wykonujemy po trzy pomiary. Wyniki notujemy w tabeli wg wzoru podanego w punkcie 4.2.

##### 3.1.2. Pomiary napięcia przebicia oleju

Zgodnie z normą PN-77/E-04408 badania przeprowadza się w układzie elektrod kulistych. Elektrody są fragmentami kul (czaszami) o średnicy 50 mm umieszczonymi w naczyniu porcelanowym. Przed badaniem iskiernik oraz naczynie powinno być umyte benzenem i wysuszone. Po napełnieniu naczynia olejem należy je odstawić na 10 min i dopiero przystąpić do pomiarów.

Badania wytrzymałości elektrycznej oleju przeprowadza się za pomocą aparatu ABO, w którym występuje układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 10.

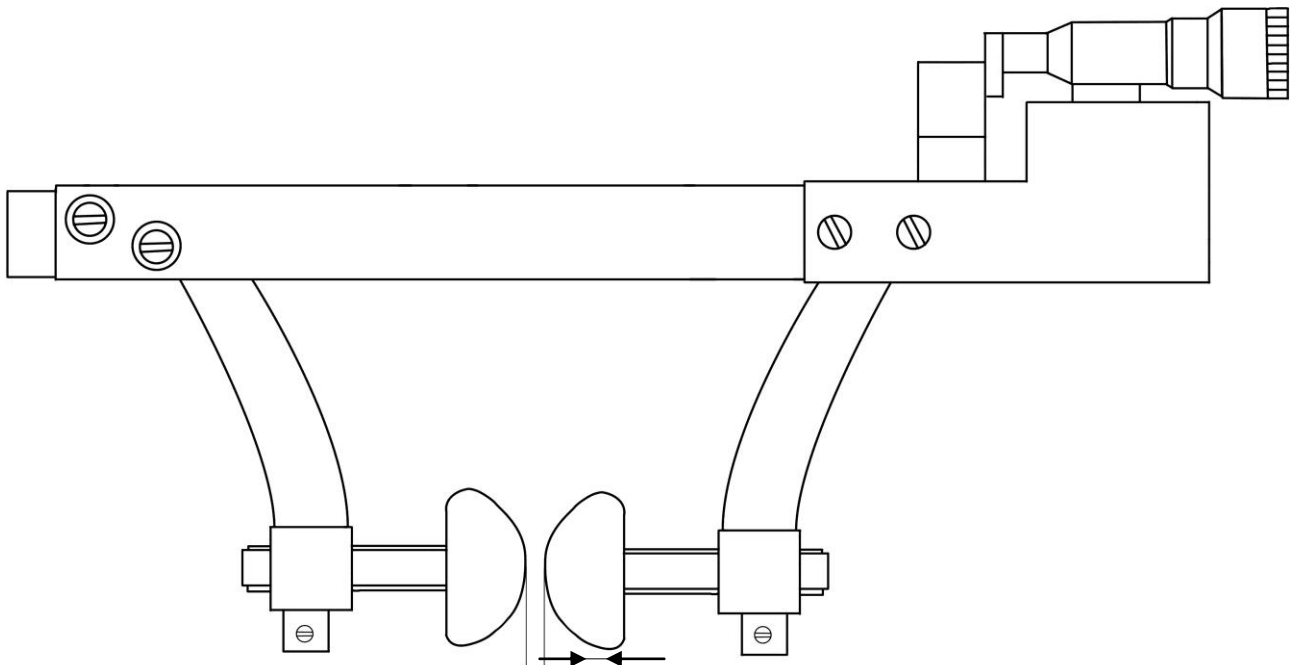


Rys. 10. Schemat układu do pomiaru wytrzymałości oleju

Pomiary napięcia przebicia oleju należy wykonać dla odstępów międzyelektrodowych w granicach od 0,5 do 4 mm, zmieniając odstęp co 0,5 mm stosując układ elektrod przedstawiony na rysunku 11.

W układzie tym odstęp międzyelektrodowy zmieniany jest za pomocą pokrętła śruby mikrometrycznej. Pokrętło śruby jest wyskalowane, posiada ono 10 podziałek. Obrót pokrętła o jedną podziałkę powoduje przesunięcie śruby, a tym samym i elektrod pomiarowych o 0,05 mm. Pełny obrót pokrętła (tj. o 10 podziałek) powoduje przesunięcie elektrod o 0,5 mm.

Jeżeli obracamy pokrętłem śruby w prawo (tj. zgodnie z ruchem wskazówek zegara) to odległość międzyelektrodowa wzrasta, natomiast na podziałce śruby mikrometrycznej maleje.



Rys. 11. Układ elektrod do badania wytrzymałości oleju

Jeżeli obracamy pokrętłem śruby w lewo (przeciwie do ruchu wskazówek zegara) to odległość międzyelektrodowa zmniejsza się, natomiast na podziałce śruby wzrasta.



Chcąc na przykład zwiększać odstęp międzyelektrodowy należy obracać pokrętkiem śruby w prawo. Ustawiając kolejno na podziałce śruby odległości 9,5 mm, 9 mm, 8,5 mm itd., uzyskuje się odstęp międzyelektrodowy kolejno 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm itd.

Po nastawieniu żadanego odstępu napięcie należy podnosić od zera ze stałą prędkością około 2 kV/s aż do przebicia. Po przebiciu olej należy zamieszać w celu szybszego rozproszenia pęcherzyków gazowych i innych produktów powstających przy wyładowaniu. Pomiar napięcia przebicia dla każdej odległości wykonujemy sześciokrotnie. Wyniki notujemy w tabeli wg wzoru podanego w punkcie 4.3.

## 4. PRZEPROWADZENIE POMIARÓW

### 4.1. Warunki atmosferyczne

- temperatura otoczenia:  $T = \dots\dots\dots^\circ\text{C}$
- ciśnienie atmosferyczne:  $p_{atm} = \dots\dots\dots\text{hPa}$
- wilgotność względna:  $\phi = \dots\dots\dots\%$

### 4.2. Pomiar napięcia przebicia powietrza w zależności od odległości międzyelektrodowej

Wyniki pomiarów wg punktu 3.1.1 umieszczamy w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów napięcia przeskoaku w powietrzu

L.p.	$a$ [mm]	$u_p$ [V]	$U_p$ [kV <sub>m</sub> ]	$U_{pn}$ [kV <sub>m</sub> ]	$E_p$ [kV <sub>m</sub> /mm]
1.					
2.					
3.					

Oznaczenia w tabeli:

$a$  - odległość międzyelektrodowa,

$u_p$  - napięcie na uzwojeniu pierwotnym transformatora probierczego, przy którym zachodzi przebicie, odczytane z woltomierza,

$U_p$  - wartość średnia napięcia przebicia,

$U_{pn}$  - wartość średnia napięcia przebicia w warunkach normalnych,

$P$  - współczynnik nierównomierności pola elektrycznego,

$E_p$  - natężenie pola elektrycznego odpowiadające napięciu przebicia.

Obliczenie gęstości powietrza wykonujemy korzystając ze wzoru:

$$\delta = 0,289 \frac{p}{T+273}, \quad (8)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie atmosferyczne w hPa,  $T$  - temperatura otoczenia w  $^\circ\text{C}$ .

Obliczamy wartości średnie z trzech kolejnych pomiarów dla poszczególnych odległości. Następnie obliczamy wartości maksymalne napięcia przebicia korzystając z zależności:

$$U_p = \sqrt{2} \cdot U_{psr} \cdot \vartheta, \quad (9)$$

gdzie:  $U_{psr}$  - wartość średnia napięcia przebicia z trzech kolejnych pomiarów,  $\vartheta$  - przekładnia transformatora probierczego.

W następnym kroku otrzymane napięcie przeskoku przeliczane jest na warunki normalne według zależności:

$$U_{pn} = \frac{U_p}{\delta}, \quad (10)$$

gdzie:  $U_{pn}$  - napięcie przeskoku w warunkach normalnych,  $\delta$  - gęstość powietrza wyznaczona przez program we wstępnych obliczeniach.

W dalszej kolejności wykonujemy obliczenie wytrzymałości dielektrycznej powietrza  $E_p$  korzystając z zależności:

$$E_p = \frac{U_{pn}}{a}, \quad (11)$$

gdzie:  $U_{pn}$  - napięcie przeskoku w warunkach normalnych,  $a$  - odległość pomiędzy kulami.

### 4.3. Pomiar napięcia przebicia oleju izolacyjnego w zależności od odległości międzyelektrodowej

Wyniki pomiarów wg punktu 3.1.2 umieszczamy w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów napięcia przebicia oleju

L.p.	$a$ [mm]	$u_p$ [kV]	$U_p$ [kV <sub>m</sub> ]	$E_p$ [kV <sub>m</sub> /mm]
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				

Oznaczenia w tabeli:

$a$  - odległość międzyelektrodowa,

$u_p$  - wartość napięcia przebicia,

$U_p$  - wartość średnia napięcia przebicia,

$E_p$  - natężenie pola elektrycznego odpowiadające napięciu przebicia (wytrzymałość dielektryczna oleju), którą obliczamy ze wzoru:

$$E_p = \frac{\sqrt{2}U_p}{a} \quad (12)$$

## 5. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- warunki atmosferyczne,
- tabele wyników pomiarów wg punktów 4.2, 4.3,
- wykresy zależności  $U_p = f(a)$ ,  $E_p = f(a)$  dla powietrza i oleju,
- uwagi i wnioski odnośnie otrzymanych wyników z komentarzem.

## 6. PYTANIA KONTROLNE

- Omówić rodzaje i własności olejów izolacyjnych stosowanych w technice wysokich napięć.
- Zalety i wady olejów mineralnych.
- Omówić rodzaje i własności olejów syntetycznych.
- Podać i omówić mechanizmy wyładowań w gazach.
- Podać i omówić mechanizmy wyładowań w dielektrykach ciekłych.
- Wpływ wody i zanieczyszczeń stałych na wytrzymałość oleju.
- Wpływ temperatury, ciśnienia i czasu działania napięcia na wytrzymałość oleju.
- Wyjaśnić zjawisko rozmiarowe.
- Omówić wpływ odległości międzyelektrodowej na wytrzymałość powietrza i oleju.
- Różnice przebiegu napięcia  $U_p$  od odległości międzyelektrodowej  $a$  dla powietrza i oleju.

## 7. LITERATURA

- Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć*. Warszawa, WNT 1988.
- Gacek Z.: *Technika wysokich napięć*. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 1994.
- Kacejko L. i inni: *Laboratorium techniki wysokich napięć*. Lublin, Skrypt Politechniki Lubelskiej 1982.
- Szpor S. i inni: *Technika wysokich napięć*. Warszawa, WNT 1978.
- PN-64/E-04050: *Pomiary wysokonapięciowe*.
- PN-77/E-04408: *Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiary napięcia przebicia*.