
INSTRUKCJA ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO NR. 8**1. CEL ĆWICZENIA**

- pomiar napięcia przebicia powietrza w zależności od ciśnienia w różnych układach elektrod przy napięciu przemiennym 50 Hz;
- obserwacja mechanizmów wyładowania (Townsenda i kanałowego) przy różnych wartościach ciśnienia.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

W układach wysokiego napięcia najczęściej spotykaną izolacją jest powietrze. Zachodzi więc potrzeba znajomości procesów jonizacyjnych, mechanizmów wyładowań oraz wytrzymałości dielektrycznej powietrza, gdyż od tych czynników uzależniona jest bezawaryjna praca układów.

Wytrzymałość dielektryczna powietrza zależy od takich czynników jak:

- ciśnienie powietrza;
- temperatura powietrza;
- wilgotność powietrza;
- konstrukcji układu izolacyjnego i zależnego od niej rozkładu natężenia pola elektrycznego.

2.1. WYŁADOWANIE W POWIETRZU WEDŁUG MECHANIZMU TOWNSEDA

W przypadku wyładowań w gazach duże znaczenie ma elektronowa jonizacja zderzeniowa. Występuje ona wyraźnie tylko w polu elektrycznym o dużym natężeniu, np. dla powietrza atmosferycznego przy 30 kV/cm. Pierwszy elektron jonizuje pierwszą cząsteczkę gazu. Dalej biegną już dwa elektrony i biorą udział w dalszych zderzeniach, które wobec rosnącej liczby elektronów zdarzają się coraz częściej. Zjawisko to nazywamy lawiną elektronową.

Townsend wyjaśnił, że lawina elektronowa wskutek zjawisk dodatkowych może być przyczyną powstawania nowych lawin poza nią, w większej odległości od anody. Elektrony te dają początek nowym lawinom elektronowym i w ten sposób wyładowanie rozwija się już samodzielnie. Prąd rośnie, aż do warunków zwarciovych. Stan taki nazywamy wyładowaniem samodzielnym.

Mechanizm Townsenda występuje tylko przy niezbyt wielkich iloczynach ciśnienia gazu p i odległości między elektrodami d . Górna

granica tego iloczynu dla powietrza w temperaturze 20 °C wynosi od 26 do 133 kPa cm, co w warunkach atmosferycznych odpowiada odstępowi międzyelektrodowemu rzędu 1 cm. Przy większych pd przeskoczenie następuje przy napięciach trochę niższych niż wynikałoby to z teorii Townsenda, mamy bowiem wówczas do czynienia z innym mechanizmem wyładowania, a mianowicie z tzw. mechanizmem kanałowym.

W przypadku danego ćwiczenia laboratoryjnego przy ciśnieniu niższym od atmosferycznego i takiej odległości między elektrodami, dla iloczynu których zachodzi wyładowanie według mechanizmu Townsenda, wyładowanie to przyjmuje postać świecącej na niebiesko, a miejscami na żółto rurki. Prąd wyładowania jest przy tym na tyle niewielki, iż zabezpieczenie nadprądowe zainstalowane na stanowisku pomiarowym nie wyłącza obwodu spod napięcia.

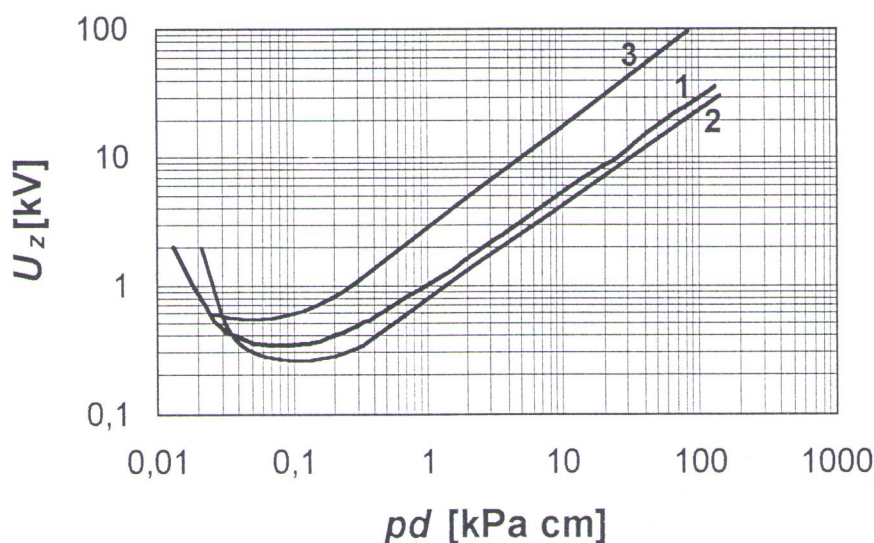
2.2. MECHANIZM KANAŁOWY WYŁADOWANIA

Przy większych wartościach iloczynu pd odległość i ciśnienie osiągają wartości, przy których 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. Opisany mechanizm wyładowania zachodzi dla iloczynu pd większego niż 26÷133 kPa•cm. 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 przy takiej odległości między elektrodami i ciśnieniu, dla iloczynu których zachodzi wyładowanie według mechanizmu kanałowego, wyładowanie to przyjmuje postać świeżącego na żółto kanału, który jest przez krótki czas widoczny między elektrodami. Prąd wyładowania jest przy tym na tyle duży, iż zabezpieczenie nadprądowe zainstalowane na stanowisku pomiarowym natychmiast wyłącza obwód spod napięcia, stąd tak krótko można obserwować ten mechanizm wyładowania.

2.3. WPLYW CIŚNIENIA NA NAPIĘCIE PRZEBICIA

Napięcie przebicia w polu elektrycznym zależy od iloczynu ciśnienia gazu p i odległości między elektrodami d , a nie od każdej z tych wielkości niezależnie. A więc jeżeli powiększyć odstęp między elektrodami n razy i jednocześnie zmniejszyć n razy ciśnienie albo na odwrót, to napięcie zapłonu nie zmieni się. Zasada ta nosi nazwę *prawa Paschena*. Zależność U_p od iloczynu pd (zwana *krzywą Paschena*) dla powietrza i azotu oraz gazu SF_6 przedstawiona jest na rys. 5.1.



Rys. 1. Zależność $U_p = f(pd)$ dla powietrza (krzywa 1), azotu (krzywa 2) oraz gazu SF_6 (krzywa 3)

W przypadku powietrza krzywa Paschena posiada minimum dla wartości iloczynu pd ok. 70 Pa cm. Aby otrzymać wykres zależności napięcia przebicia od ciśnienia $U_p = f(p)$ musimy wykorzystać krzywą Paschena dla powietrza, przyjmując stałą odległość d między elektrodami. Dla różnych odległości otrzymamy w ten sposób szereg charakterystyk $U_p = f(p)$, których kształt podobny będzie do kształtu krzywej Paschena, przy czym minimum U_p przypadając będzie na różne wartości p , w zależności od przyjętego odstęp między elektrodami.

2.4. WPLYW TEMPERATURY NA NAPIĘCIE PRZEBICIA

Jeżeli temperatura powietrza znacznie odbiega od normalnej (osiąga wartości rzędu kilku tysięcy K), to zachodzą w nim procesy jonizacji termicznej. Przy tak wysokiej temperaturze stopień zjonizowania powietrza jest na tyle duży, iż wystarcza to do zapłonu wyładowania samoistnego i przebicia nawet w przypadku niewielkiego natężenia pola elektrycznego. Jednak podgrzanie powietrza do tak wysokiej temperatury w przypadku warunków atmosferycznych nie jest możliwe. Temperatura taka jest natomiast możliwa do uzyskania wewnątrz palącego się łuku elektrycznego, a więc już po przebicciu gazu, w związku z czym nie ma ona wpływu na napięcie przebiccia, a jedynie na podtrzymanie wyładowania.

W przypadku, gdy temperatura powietrza nieznacznie odbiega od warunków normalnych (mieści się w zakresie zmian atmosferycznych), napięcie przebiccia zależy od jego gęstości względnej δ .

Wyraża się ona wzorem:

$$\delta = 0,289 \frac{p}{273 + T}$$

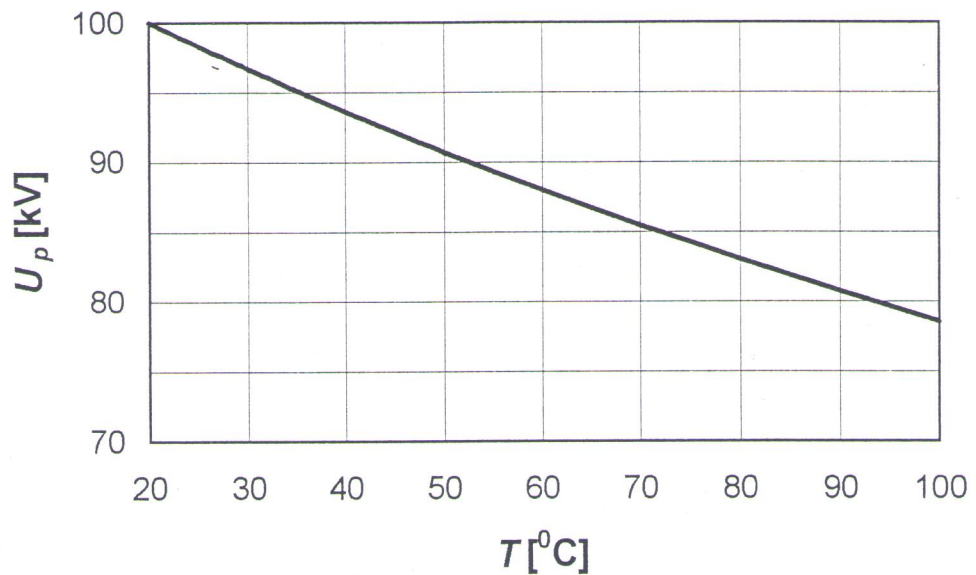
gdzie: p — ciśnienie, w hPa; T — temperatura, w $^{\circ}\text{C}$.

W związku z tym napięcie przebiccia:

$$U_p = U_{pn} \delta = 0,289 U_{pn} \frac{p}{273 + T}$$

gdzie: U_{pn} — napięcie przebiccia w warunkach normalnych.

Na podstawie powyższego wzoru można stwierdzić, iż przy stałym ciśnieniu napięcie przebiccia maleje wraz ze wzrostem temperatury. Przykładowy wykres $U_p = f(T)$ przedstawiony jest na rys. 5.2.



Rys. 2. Zależność napięcia przebicia powietrza od temperatury dla układu elektrod płaskich, dla których $U_{pn} = 100$ kV, $d = 6$ cm

2.5. WPLYW WILGOTNOŚCI NA NAPIĘCIE PRZEBICIA

W układach o polu jednostajnym (np. płyta-płyta) wilgotność praktycznie biorąc nie wywiera żadnego wpływu na napięcie przebicia, natomiast w układach o polu silnie odbiegającym od jednostajnego (pręt-pręt, ostrze-ostrze) wpływ wilgotności jest znaczący, przy czym przy zwiększaniu wilgotności napięcie przebicia wzrasta.

Bierze się to stąd, iż cząsteczki pary wodnej, jako elektroujemne (mające skłonność do wiązania się z elektronami), wychwytyują elektrony, sprzyjając powstawaniu jonów ujemnych, co zmniejsza liczbę swobodnych elektronów w gazie i hamuje rozwój wyładowania.

Zwykle wyraża się napięcie przeskoku w funkcji *wilgotności bezwzględnej* w , podawanej w gramach na metr sześcienny. Jako normalną wilgotność bezwzględną powietrza przyjmuje się wartość 11 g/m^3 . Wartość w można obliczyć po zmierzeniu *wilgotności względnej* ϕ wyrażonej w procentach za pomocą psychometru stosując wzór:

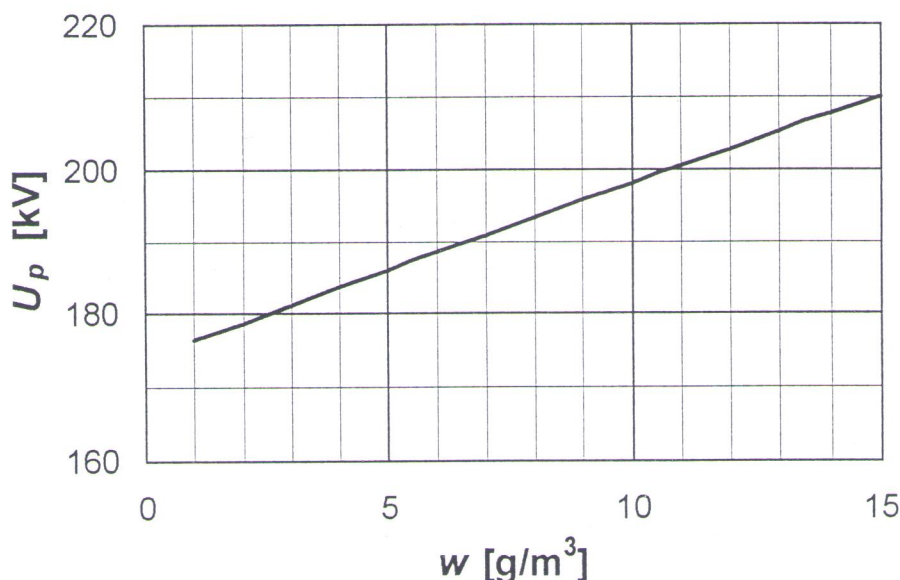
$$w = \phi w_n$$

gdzie: w_n — wilgotność bezwzględna powietrza w stanie nasycenia, w g/m^3 . Wartość w_n zależy od temperatury w sposób podany w tablicy zamieszczonej w laboratorium.

Dla układów o polu silnie nierównomiernym napięcie przebicia zależy od wilgotności bezwzględnej według poniższego wzoru:

$$U_{pw} = U_{pn} \delta \left(0,87 + 0,012 \frac{w}{\delta} \right)$$

gdzie: U_{pw} — napięcie przebicia przy wilgotności w ; U_{pn} — napięcie przebicia w warunkach normalnych; δ — gęstość względna powietrza.



Rys. 3. Zależność napięcia przebicia od wilgotności bezwzględnej powietrza dla układu elektrod ostrze-ostrze uziemione przy napięciu przemiennym: $f=50$ Hz, $T=20^{\circ}\text{C}$, $p=1013$ hPa, $d=50$ cm, $U_{pn}=200$ kV

Wzór powyższy jest słuszny dla ilorazu w/δ zawartego w przedziale od 1 g/m^3 do 15 g/m^3 .

Przykładowa zależność napięcia przebicia od wilgotności dla układu elektrod ostrze — ostrze uziemione przedstawiona jest na rys. 5.3.

2.6. Wpływ częstotliwości na napięcie przebicia

Wytrzymałość statyczna jest pojęciem, które występuje przy napięciu stałym lub też przy napięciach przemiennych o niezbyt wielkiej częstotliwości (do 500 Hz). Zmiany takiego napięcia są bowiem bardzo powolne w stosunku do prędkości występowania zjawisk w wyładowaniach. O przeskoaku iskrowym decyduje wartość szczytowa takiego napięcia. W przypadku napięcia przemiennego o częstotliwości technicznej rozwój wyładowania jest identyczny jak dla napięcia stałego. Jedyna różnica polega na tym, iż do wyładowania dojdzie w czasie, gdy na elektrodzie o mniejszym promieniu krzywizny wystąpi dodatni półokres napięcia.

Warunki przy napięciu sinusoidalnie przemiennym wielkiej częstotliwości różnią się zarówno od warunków przy małej częstotliwości, jak i od udarowych. Wysokie wierzchołki napięcia powtarzają się szybko

po sobie, tak że zapoczątkowanie wyładowania w jednym półokresie może ułatwić rozwój wyładowania w następnym półokresie. Wyzwolone elektrony i jony w jednym wierzchołku mogą nie uciec z pola elektrycznego przed przyjściem drugiego wierzchołka napięcia. Tworzą więc ładunki przestrzenne, odkształcające pole elektryczne. Wyładowania niezupełne stają się przy zwiększeniu częstotliwości coraz silniejsze i nabierają cech wyładowań zupełnych, tj. powodują znaczne obniżenie napięcia. Sprzężenia pojemnościowe bardzo dobrze zamykają obwód w przedłużeniu wyładowań niezupełnych.

Niejednostajność pola elektrycznego przy wielkich częstotliwościach znacznie silniej zmniejsza wytrzymałość elektryczną niż przy małych. Na przykład dla układu ostrzowego wytrzymałość przy częstotliwości 10 kHz różni się już wyraźnie od statycznej, przy 100 kHz jest mniejsza o kilkadziesiąt procent, a przy 1000 kHz kilkakrotnie mniejsza.

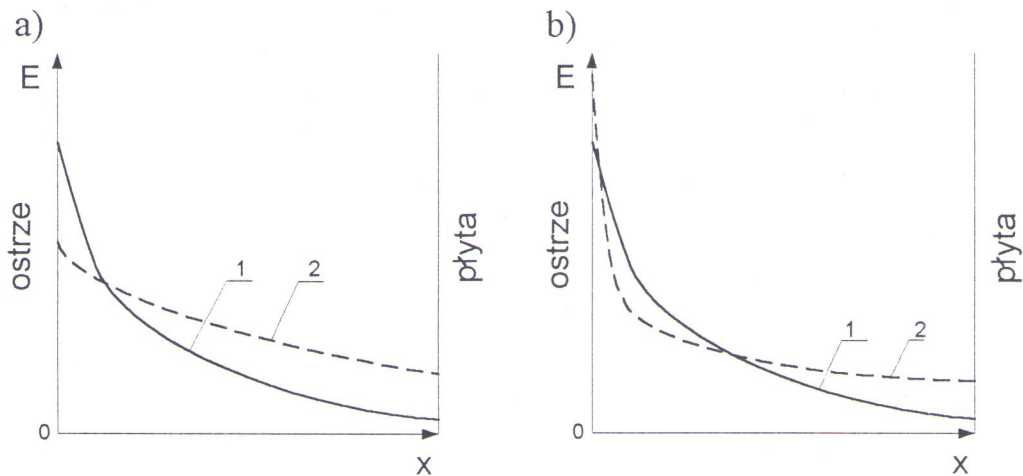
W przypadku pola elektrycznego jednostajnego wpływ częstotliwości jest znacznie mniejszy. Na przykład dla iskiernika kulowego przy odstępnie 0,2 cm napięcie przeskoku do ok. 20 kHz prawie nie zmienia się, następnie maleje osiągając minimum przy ok. 3 MHz równe ok. 80% wytrzymałości statycznej, dalej rośnie i przy 100 MHz osiąga wartość powyżej 150% wytrzymałości statycznej.

W obszarze minimum działają ładunki przestrzenne jonów dodatnich, ponieważ elektrony zdążą uciec z pola elektrycznego. Przy większych częstotliwościach elektrony nie nadążają i swoją obecnością kompensują działanie jonów dodatnich na pole elektryczne. Zarazem występuje wyraźny wpływ opóźnienia zapłonu jak w warunkach udarowych przy bardzo krótkich czasach, co pozwala wyjaśnić wzrost wytrzymałości powyżej poziomu statycznego. Przy większych odległościach podobne zmiany napięcia przeskoku występują przy mniejszych częstotliwościach.

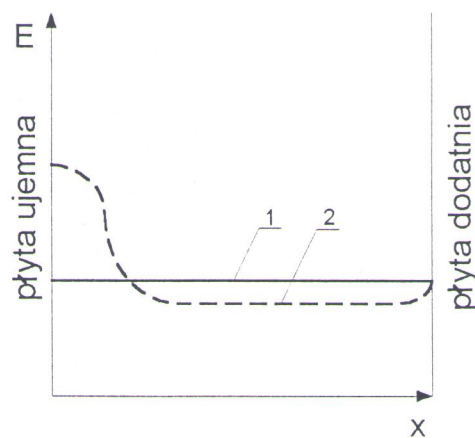
2.7. Wpływ rozkładu pola elektrycznego na napięcie przebicia

Wartość przyłożonego napięcia nie jest podstawowym kryterium decydującym o wytrzymałości dielektrycznej danego układu izolacyjnego. Wielkością, która bezpośrednio wpływa na wartość napięcia przebicia nie jest różnica potencjałów, ale rozkład potencjału wzdłuż drogi wyładowania, a co się z tym wiąże także rozkład natężenia pola elektrycznego. Rozkład ten zależy od kształtu elektrod oraz od ich wzajemnej odległości, w związku z czym dla różnych układów elektrod i różnej odległości między nimi wartość napięcia przebicia będzie inna w każdym przypadku.

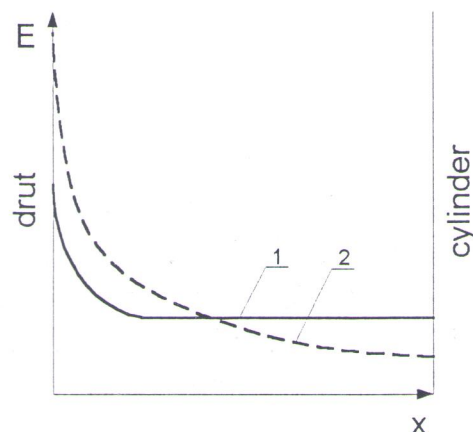
Na rys. 5.4., 5.5. i 5.6. przedstawiono przykładowe rozkłady natężenia pola elektrycznego dla kilku układów elektrod.



Rys. 4. Rozkład pola elektrycznego w układzie ostrze- płyta przy różnych biegunowościach: a) ostrze dodatnie; b) ostrze ujemne
1-bez wpływu ładunków przestrzennych, 2-przy wpływie ładunków przestrzennych wytwarzanych przez ulot z ostrza



Rys.5 Rozkład natężenia pola w układzie płyta- płyta
1-bez wpływu ładunków przestrzennych,
2-przy wpływie ładunków przestrzennych



Rys. 6. Rozkład natężenia pola elektrycznego w układzie walców współosiowych
1-bez wpływu ładunków przestrzennych,
2-przy wpływie ładunków przestrzennych wytwarzanych przez ulot z elektrody wewnętrznej

W przypadku układów elektrod o polu jednostajnym lub umiarkowanie niejednostajnym (np. płyta-płyta, iskiernik kulowy itp.) natężenie pola na długości drogi międzyelektrodowej jest stałe lub co najwyżej niewiele odbiega od natężenia średniego (rys. 5.5.). W układach takich do elektrod należy przyłożyć stosunkowo dużą wartość napięcia aby spowodować przebicie ponieważ dopiero przy takim napięciu natężenie pola osiąga wartość wystarczającą do rozpędzenia elektronów do prędkości pozwalającej im jonizować cząsteczki gazu.

W układach o polu silnie niejednostajnym (np. ostrze-ostrze, ostrze-płyta, układ elektrod cylindrycznych itp.) już po przyłożeniu do elektrod stosunkowo niewielkiej różnicy potencjałów dochodzi do przebicia gazu, poprzedzonego często wyładowaniem koronowym. Spowodowane jest to tym, iż w pobliżu elektrod o ostrych kształtach natężenie pola elektrycznego osiąga znaczne wartości wielokrotnie przekraczające wartości natężenia w pozostałej części odstępów między elektrodami lub w pobliżu przeciwnej elektrody (rys 5.6.). W obszarach o zwiększonym natężeniu pola dochodzi do wyładowań niezupełnych, gdyż przyspieszane elektrony osiągają tam energie wystarczające do jonizacji cząsteczek gazu. Wyładowania te z kolei są źródłem swobodnych elektronów oraz fotonów o dużej energii zdolnych zjonizować lub pobudzić cząsteczki gazu. W rezultacie liczba nośników prądu jest przy tym samym napięciu i odległości między elektrodami większa w układach o polu niejednostajnym. Inaczej mówiąc w układach tych istnieją lepsze warunki do wystąpienia wyładowania zupełnego. Tam więc, gdzie pole elektryczne ma niejednorodny rozkład (szczególnie w pobliżu elektrod o ostrych krawędziach) napięcie przebicia ma mniejszą wartość, niż w układach o polu jednostajnym lub zbliżonym do jednostajnego.

Z rozkładem pola elektrycznego związana jest także różnica napięć przebicia dla napięcia stałego przy różnej biegunowości. Związane jest to z występowaniem ładunku przestrzennego, który powoduje miejscowe osłabienie lub wzmocnienie pola. W przypadku różnych biegunowości przy niejednakowych elektrodach na skutek występowania ładunku przestrzennego pole przy elektrodzie o małym promieniu krzywizny jest raz wzmocniane, a raz osłabiane (rys.5.4.). Wpływ biegunowości uwidacznia się szczególnie w układach, w których elektrody różnią się znacznie kształtem (np. ostrze-płyta), natomiast w układach, w których obie elektrody są identyczne biegunowość napięcia nie ma znaczenia, ze względu na symetrię pola przy obu biegunowościach.

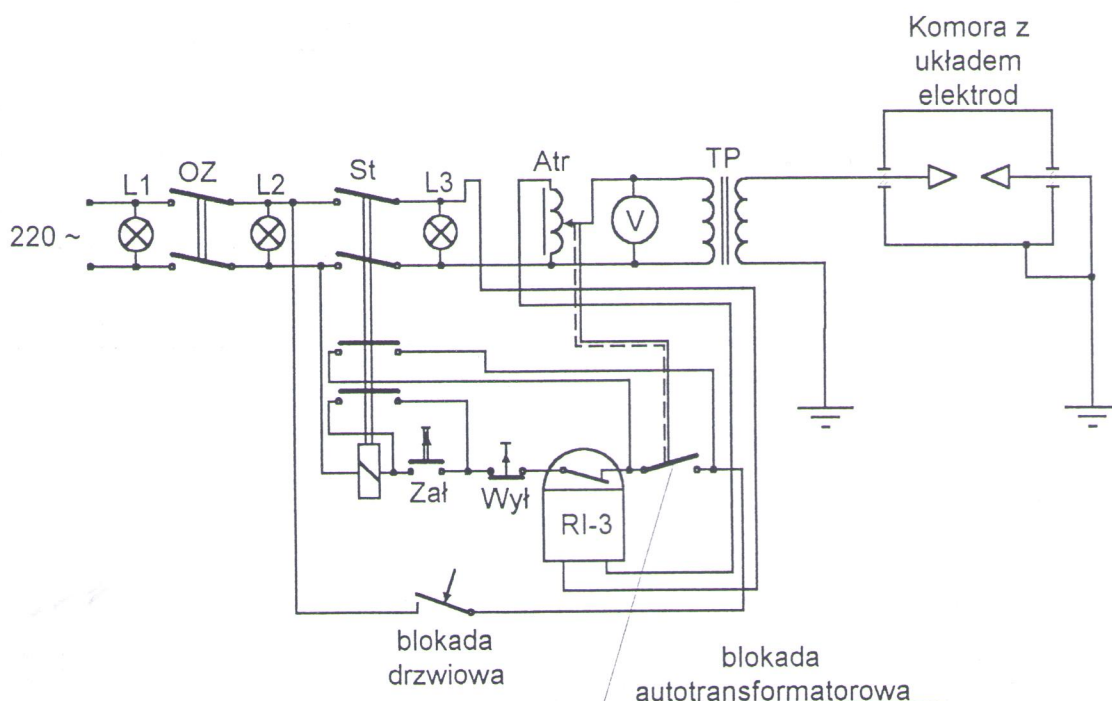
3.PROGRAM ĆWICZENIA

- wyznaczyć zależność napięcia przebicia powietrza od ciśnienia w czterech układach elektrod: ostrze-ostrze uziemione, pręt-pręt uziemiony, ostrze-płyta uziemiona i płyta-ostrze uziemione;
- zaobserwować mechanizmy wyładowania w badanych układach elektrod przy różnych wartościach ciśnienia i odnotować zakres ciśnień, przy których te mechanizmy wystąpiły.

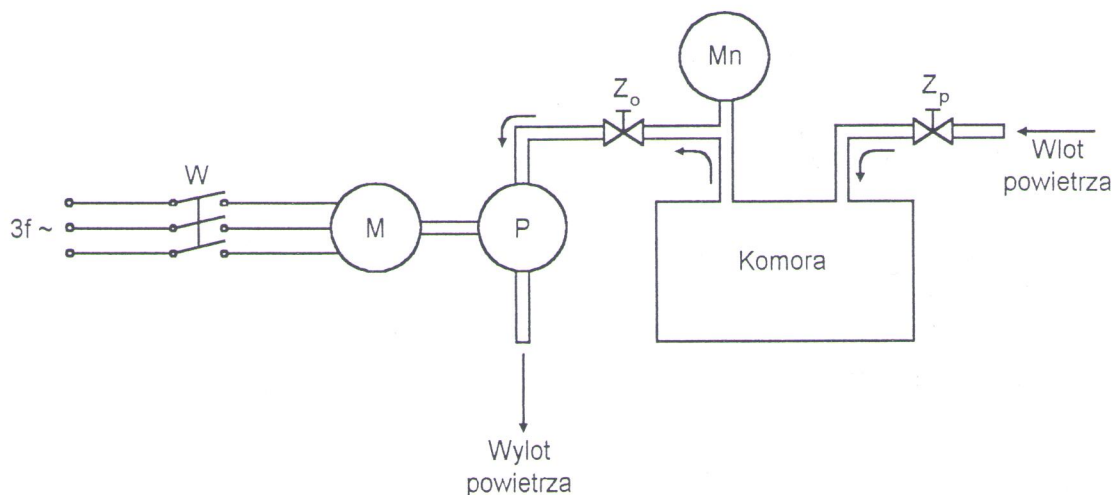
4.SPOSÓB PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

4.1Układ pomiarowy

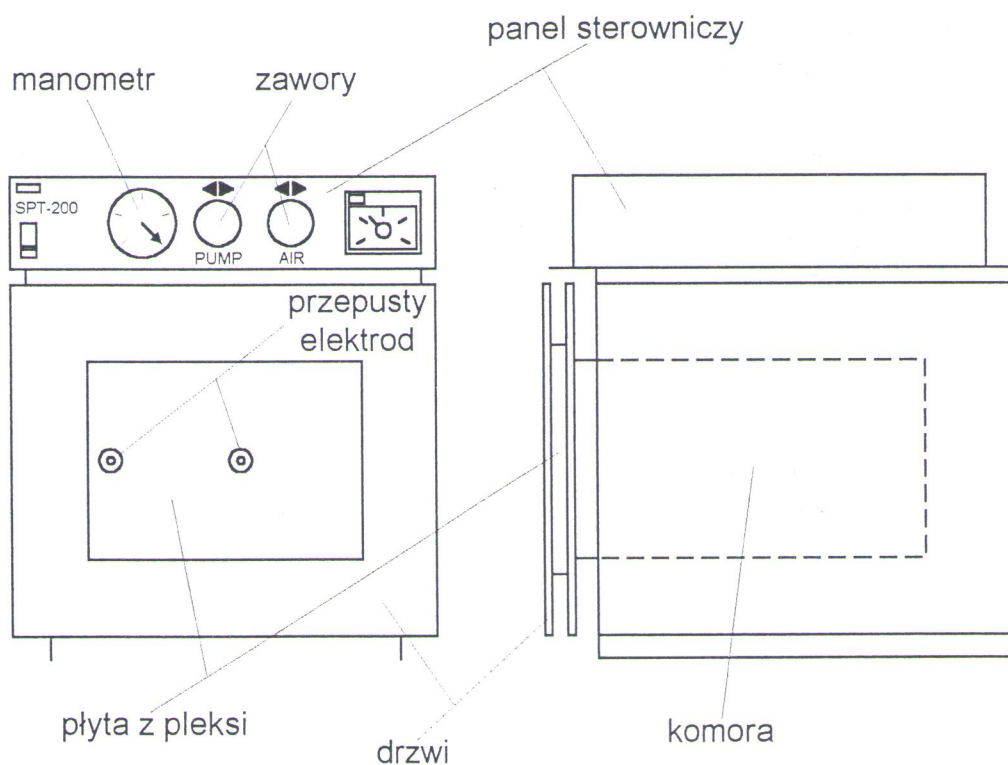
- pomiarów dokonujemy w układzie, którego schemat przedstawiony jest na rys. 5.7.;
- schemat zasilania i podłączenia do komory pompy próżniowej przedstawiony jest na rys. 5.8.;
- wygląd komory ciśnieniowej wraz z obudową i panelem sterowniczym przedstawiony jest na rys. 5.9.



Rys. 7. Schemat elektryczny układu pomiarowego



Rys. 8. Schemat układu zasilania pompy próżniowej i sposób jej połączenia z komorą



Rys. 9. Komora ciśnieniowa

4.2. Przeprowadzenie pomiarów

Po połączeniu układu pomiarowego zgodnie z rys. 5.7. i 5.8. należy umieścić w komorze ciśnieniowej odpowiedni układ elektrod, a następnie zamknąć drzwiczki komory i zawory: powietrzny Z_p oraz odpompowujący Z_o (rys. 5.8.), oznaczone na panelu sterowania odpowiednio: „AIR” i „PUMP” (rys. 5.9.). Aby zmniejszyć ciśnienie w komorze załączamy silnik

M pompy P wyłącznikiem W (rys. 5.8.), a następnie otwieramy zawór odpompowujący Z_o . Gdy ciśnienie w komorze osiągnie wartość, przy której dokonywany będzie pomiar napięcia przebiccia, należy zamknąć zawór Z_o i wyłączyć silnik.

Dokonyjemy pomiarów napięcia przebiccia dla każdego układu elektrod przy kilkunastu wartościach ciśnienia w komorze, podanych przez prowadzącego ćwiczenia. Dla każdej wartości ciśnienia wykonujemy po 5 pomiarów. Wyniki notujemy w tablicy wg wzoru podanego w punkcie 5.5. Napięcie należy zwiększać ze stałą prędkością (1-2 kV/s). Po skończonych pomiarach należy ciśnienie w komorze zwiększyć do wartości atmosferycznej. W tym celu należy powoli otworzyć zawór powietrzny Z_p i poczekać, aż wewnątrz komory wypełni się powietrzem, a wskazówka manometru zatrzyma się na wartości 0.

Podczas pomiarów napięcia przebiccia należy zaobserwować mechanizm wyładowania między elektrodami (Townsenda lub kanałowy) i szacunkowo określić zakres ciśnienia, dla którego wystąpił.

UWAGA: Zabronione jest otwieranie drzwiczek komory przy ciśnieniu innym niż atmosferyczne panującym w jej wnętrzu, gdyż grozi to uszkodzeniem stanowiska laboratoryjnego.

5. TABLICE POMIAROWE

5.1 Warunki atmosferyczne

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

5.2 Pomiar napięcia przebicia w zależności od ciśnienia

Wyniki pomiarów należy zestawić w poniższej tabelicy:

$p_{atm} = \dots\dots\dots \text{hPa}$		$T = \dots\dots\dots ^\circ\text{C}$		$\phi = \dots\dots\dots \%$		$\mathcal{G} = \dots\dots\dots \text{V/V}$	
Lp	p_{Mn} —	p hPa	u_p V	$u_{p\acute{s}r}$ V	U_p kV _{sk}		
1							
2							
3							
4							
5							

Oznaczenia w tabelicy:

\mathcal{G} - przekładnia napięciowa transformatora probierczego;

p_{Mn} - ciśnienie wewnątrz komory odczytane z manometru;

p - ciśnienie wewnątrz komory przeliczone na hPa według zależności:

$$p = (1 - p_{Mn}) p_{atm}$$

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

$u_{p\acute{s}r}$ - średnia wartość napięcia u_p z pięciu kolejnych pomiarów dla określonej wartości ciśnienia;

U_p - wartość szczytowa napięcia przebicia określona z zależności:

$$U_p = \sqrt{2} \frac{u_{p\acute{s}r}}{\mathcal{G}}$$

6 SPORZĄDZENIE WYKRESÓW

Należy wykonać osobne wykresy zależności napięcia przebicia U_p od ciśnienia p dla każdego z czterech układów elektrod oraz dodatkowy

wykres zawierający dla porównania wszystkie zależności na jednym rysunku. Wykresy te należy wykonać w skali logarytmicznej.

7. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu powinny się znaleźć:

- schemat układu pomiarowego;
- dane określające warunki atmosferyczne;
- tabele wyników pomiarów i obliczeń wg punktu 5.5.2.;
- wykresy zależności $U_p=f(p)$ wg punktu 5.6.;
- uwagi i wnioski dotyczące warunków i sposobu przeprowadzenia pomiarów oraz ocena otrzymanych wyników.

Przeprowadzanie pomiarów przy ciśnieniach

Podać wartość napięć przy których występują poszczególne mechanizmy.....

8. Pytania:

1. Podać rodzaje wyładowań występujące w powietrzu w zależności od kształtu elektrod.
2. Wyjaśnić korzystając z krzywej Paschena, dlaczego wytrzymałość dielektryczna powietrza rośnie w przedziale p.d. powyżej $0.5\text{kPa}\cdot\text{cm}$ i poniżej $0.05\text{kPa}\cdot\text{cm}$.
3. Wyjaśnić zmianę wytrzymałości układu przy zastosowaniu różnych gazów (powietrza, azotu, SF₆)
4. Jaki jest wpływ temperatury i wilgotności powietrza na wytrzymałość dielektryczną powietrza i innych gazów w zależności od kształtu elektrod.