

# SPIS TREŚCI

Przedmowa .....	5
Regulamin pracy obowiązujący w Laboratorium Techniki Wysokich Napięć .....	7
Ćwiczenie 1. <i>Pomiary wysokiego napięcia przemiennego</i> .....	9
Ćwiczenie 2. <i>Wytrzymałość powietrza przy napięciu przemiennym w polu niejednostajnym i jednostajnym</i> .....	23
Ćwiczenie 3. <i>Wytrzymałość powietrza w układach elektrod walców współosiowych i równoległych mimoosiowych przy napięciu przemiennym</i> .....	41
Ćwiczenie 4. <i>Wytrzymałość powietrza przy napięciu stałym</i> .....	53
Ćwiczenie 5. <i>Wytrzymałość powietrza przy napięciu stałym i przemiennym w układzie z przegrodami</i> .....	65
Ćwiczenie 6. <i>Badanie wyladowań ślizgowych</i> .....	75
Ćwiczenie 7. <i>Ocena wyladowań niezupełnych metodą emisji akustycznej</i> .....	89
Ćwiczenie 8. <i>Lokalizacja miejsc wyladowań niezupełnych w transformatorze energetycznym przy wykorzystaniu metody triangulacyjnej</i> .....	101
Ćwiczenie 9. <i>Przebiegi ferrozonansowe</i> .....	113
Ćwiczenie 10. <i>Badanie wytrzymałości udarowej powietrza</i> .....	121
Ćwiczenie 11. <i>Wytwarzanie i pomiary napięć udarowych</i> .....	129
Ćwiczenie 12. <i>Przebiegi falowe w liniach długich</i> .....	143
Ćwiczenie 13. <i>Badania odgromników zaworowych</i> .....	155
Ćwiczenie 14. <i>Badanie wytrzymałości elektrycznej dielektryków stałych</i> .....	163
Ćwiczenie 15. <i>Rozkład napięcia na łańcuchu izolatorów kołpakowych</i> ..	175
Metody opracowywania wyników badań .....	189
Literatura przedmiotu .....	196

## Ćwiczenie nr 2

# WYTRZYMAŁOŚĆ POWIETRZA PRZY NAPIĘCIU PRZEMIENNYM W POLU NIEJEDNOSTAJNYM I JEDNOSTAJNYM

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z izolacyjnymi własnościami powietrza i mechanizmami jego przebicia. Praktycznymi układami, w których jest badana wytrzymałość powietrza, są układy elektrod: ostrze - ostrze, kula - kula, ostrze - płyta, płyta - płyta. Ćwiczenie umożliwia porównanie wytrzymałości i mechanizmów przebicia powietrznych układów izolacyjnych z polem jednostajnym i niejednostajnym. Część teoretyczna ćwiczenia obejmuje zagadnienia związane z jonizacją powietrza, warunek Townsenda, charakterystykę jonizacji i prawo Paschena.

### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

#### 2.1. Charakterystyka powietrza jako dielektryka

Powietrze jest naturalnym, powszechnie występującym dielektrykiem gazowym, stanowi mieszaninę azotu (78%), tlenu (21%) oraz wodoru, dwutlenku węgla i gazów szlachetnych (1%). Stosowane jest w układach izolacyjnych otwartych (elektroenergetycznych liniach przesyłowych WN) oraz zamkniętych (wyłącznikach próżniowych).

Wytrzymałość układów izolacyjnych zawierających powietrze zależy od czynników technicznych oraz od jego parametrów fizycznych. Do pierwszej grupy można zaliczyć:

- kształt elektrod (a tym samym rozkład jednostajny lub niejednostajny pola elektrycznego),
- rodzaj przyłożonego napięcia (stałe, przemienne, udarowe) i czas jego oddziaływania,
- stan powierzchni (gładkość, ewentualne zabrudzenia).

Natomiast do najważniejszych właściwości fizycznych należą: ciśnienie, temperatura oraz wilgotność (ma znaczenie w układach o polu niejednostajnym).

W normalnych warunkach atmosferycznych ( $T=293\text{ K}$ ,  $p=1013\text{ hPa}$ ) powietrze posiada bardzo dobre własności izolacyjne (pomijalną przewodność i stratność dielektryczną). W takim stanie na ogólną liczbę  $10^{19}$  cząstek/cm<sup>3</sup> w gazie znajduje się około  $10^3$  ładunków swobodnych (jonów i elektronów). Jednak pod wpływem czynników zewnętrznych, może dojść do zjawiska jonizacji, prowadzącej do pojawienia się znacznych ilości cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym. Do czynników, które mogą wywołać efekt jonizacji można zaliczyć:

- pole elektryczne,
- temperaturę,
- promieniowanie świetlne i elektromagnetyczne.

## 2.2. Podstawowe mechanizmy jonizacji i dejonizacji powietrza

W zależności od występujących warunków, procesy jonizacyjne w gazach można podzielić na dwie grupy:

- a) jonizacja przestrzenna, do której zaliczana jest:
  - jonizacja zderzeniowa: elektronowa, jonowa, cieplna (międzycząsteczkowa)
  - fotojonizacja,
- b) jonizacja powierzchniowa.

Jonizacja zderzeniowa zachodzi podczas zderzenia dwóch cząsteczek (np. atomów, elektronów lub jonów), podczas którego następuje wzajemne przekazywanie energii oraz zmiana parametrów ruchu (prędkości, kierunku). W chwili zderzenia cząsteczki posiadają energię kinetyczną, którą można opisać wzorem [18]:

$$W_e = \frac{m \cdot \vartheta^2}{2} \quad (2.1)$$

gdzie:

- $W_e$  – energia cząsteczki,
- $m$  – masa cząsteczki,
- $\vartheta$  – prędkość cząsteczki.

Ze względu na większe (w porównaniu do jonów) prędkości osiągnięte przez elektrony, a w związku z tym również większe wartości energii kinetycznej, podstawowe znaczenie w procesach zderzeniowych ma jonizacja elektronowa. W powietrzu przy ciśnieniu  $10^5\text{ Pa}$ , temperaturze  $0^\circ\text{C}$  i natężeniu pola elektrycznego  $30\text{ kV/cm}$  prędkości elektronów i jonów w przybliżeniu wynoszą odpowiednio:  $1,5 \cdot 10^5\text{ m/s}$  i  $3 \cdot 10^2\text{ m/s}$ . Jony, charakteryzujące się znacznie

większymi masami, nie osiągają odpowiednio dużych prędkości, a tym samym energii umożliwiających jonizację. Warunkiem jonizacji, przy zderzeniu dwóch cząstek, jest by energia jednej z nich była większa od energii jonizacji danego gazu (wzór 2.2).

$$W_e \geq W_j \quad (2.2)$$

gdzie:

$W_j$  – energia jonizacji gazu.

W przypadku jonizacji schodkowej, zachodzącej po  $n$  zderzeniach:

$$\sum_{i=1}^n W_{ei} \geq W_j \quad (2.3)$$

Poziom wymaganej energii jonizacyjnej jest różny w zależności od rodzaju gazu. W przypadku głównych składników powietrza wynosi dla azotu 14,5 eV, a dla tlenu 12,5 eV (1eV=  $1,6 \cdot 10^{-19}$ J).

Jonizacja cieplna jest wynikiem znacznego wzrostu temperatury, powodującego wzrost energii kinetycznej cząsteczek gazu, którą można określić jako:

$$W_k = \frac{3}{2} k \cdot T, \quad (2.4)$$

gdzie:

$W_k$  – energia kinetyczna gazu,

$k$  – stała Boltzmanna ( $k=1,37 \cdot 10^{-23}$  J/K =  $8,61 \cdot 10^{-5}$  eV/K),

$T$  – temperatura gazu [K].

W temperaturze 293 K poziom energii kinetycznej gazu wynosi około  $3,8 \cdot 10^{-2}$  eV i jest zbyt mały, aby wywołać efekt jonizacji. Jonizacja termiczna może zachodzić w bardzo wysokich temperaturach, nie mniejszych niż (5000-6000) K (np. w łuku wielkopądowym) i ma duże znaczenie w końcowej fazie wyładowania. W niższych temperaturach proces może przebiegać z dużo mniejszą intensywnością, w sposób schodkowy.

Fotojonizacja ma miejsce, jeżeli energia promieniowania  $W_p$  jest większa od energii jonizacji danego gazu  $W_j$ , co można wyrazić wzorem:

$$W_p = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq W_j, \quad (2.5)$$

gdzie:

- h – stała Plancka ( $h=6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ ),
- v – częstotliwość promieniowania,
- c – prędkość światła,
- $\lambda$  – długość fali promieniowania.

Po przekształceniu zależności (2.5) można określić największą długość fali promieniowania, która wywołuje efekt jonizacji gazu:

$$\lambda \leq \frac{h \cdot c}{W_j} \quad (2.6)$$

Po podstawieniu wartości stałych  $c$  i  $h$  długość ta może być obliczona ze wzoru [7]:

$$\lambda \leq \frac{1,23 \cdot 10^{-6}}{W_j} \quad (2.7)$$

Przykładowo dla tlenu, po podstawieniu wartości  $W_j=12,5\text{eV}$ , otrzyma się maksymalną długość fali promieniowania jonizującego na poziomie  $\lambda \leq 101,5$  nm. Działanie jonizujące mają promieniowanie: ultrafioletowe ( $\lambda=150\text{-}380$  nm), rentgenowskie ( $\lambda=0,04\text{-}5$  nm) oraz gamma ( $\lambda=0,01\text{-}0,4$  nm). Ze względu na zbyt dużą długość fali, energia promieniowania widzialnego jest niewystarczająca do wywołania bezpośredniej jonizacji.

Jonizacja powierzchniowa jest zjawiskiem określanym jako proces katodowy. Emisja elektronów znajdujących się w paśmie przewodnictwa metalu, z którego jest wykonana elektroda, jest związana z pokonaniem przez nie pracy wyjścia, która wynosi w granicach 1-6 eV (np. dla aluminium jest na poziomie 1,7-3,9 eV). Dostarczenie energii elektronom może odbywać się poprzez:

- naświetlanie powierzchni elektrod (fotoemisja, emisja fotoelektryczna),
- wytworzenie silnego pola elektrycznego (emisja polowa, autoelektronowa),
- rozgrzanie elektrody (termoemisja),
- bombardowanie elektrody jonami dodatnimi (emisja jonowa).

Ponieważ energia jonizacji gazu jest większa od pracy wyjścia elektronów z katody ( $W_j > W_{pw}$ ), jonizacja przestrzenna może być poprzedzona przez emisję elektronów z powierzchni elektrod. W układach izolacyjnych wysokiego napięcia z dielektrykiem gazowym do najważniejszych procesów jonizacji powierzchniowej można zaliczyć fotojonizację, bombardowanie powierzchni elektrod jonami dodatnimi i emisję polową.

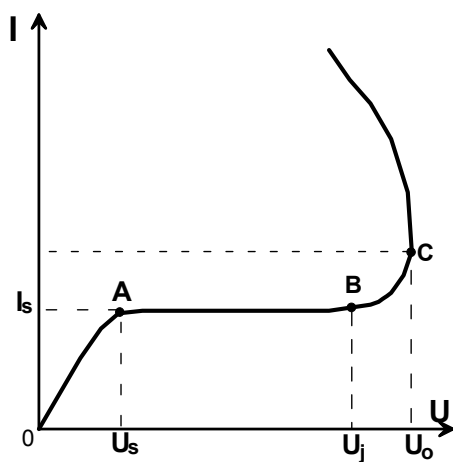
Oddziaływanie cząsteczek o zróżnicowanym ładunku może prowadzić do procesów odwrotnych do jonizacji (tzw. dejonizacji), wśród których można wyróżnić:

- rekombinację,
- dyfuzję elektronów i jonów,
- wiązanie elektronów przez cząsteczki gazu.

Rekombinacja polega na zubożeniu się cząsteczek o różnoimiennych ładunkach, na skutek przekazywania sobie ładunku podczas zderzenia. Może to nastąpić w przypadku zderzenia elektronu z jonem dodatnim lub zderzenia różnoimiennych jonów. Podczas rekombinacji następuje wypromieniowanie energii, co może prowadzić do fotojonizacji atomów znajdujących się w tym obszarze. Z kolei dyfuzja polega na przemieszczaniu się, w wyniku ruchów cieplnych, jonów i elektronów z obszarów o większej koncentracji do obszarów o mniejszej koncentracji. Ostatnie zjawisko polegające na wiązaniu elektronów przez cząsteczki gazu, powoduje powstanie cząsteczek obojętnych (po połączeniu się jonu dodatniego z elektronem) lub jonu ujemnego (jeśli atom przyłącza elektron).

### 2.3. Charakterystyka prądowo-napięciowa jonizacji powietrza

Jeżeli do okładzin powietrznego kondensatora płaskiego zostanie przyłożone napięcie, które będzie stopniowo zwiększane, to uzyska się charakterystykę prądowo-napięciową (jonizacji), która jest zilustrowana na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Charakterystyka prądowo-napięciowa powietrznego kondensatora płaskiego

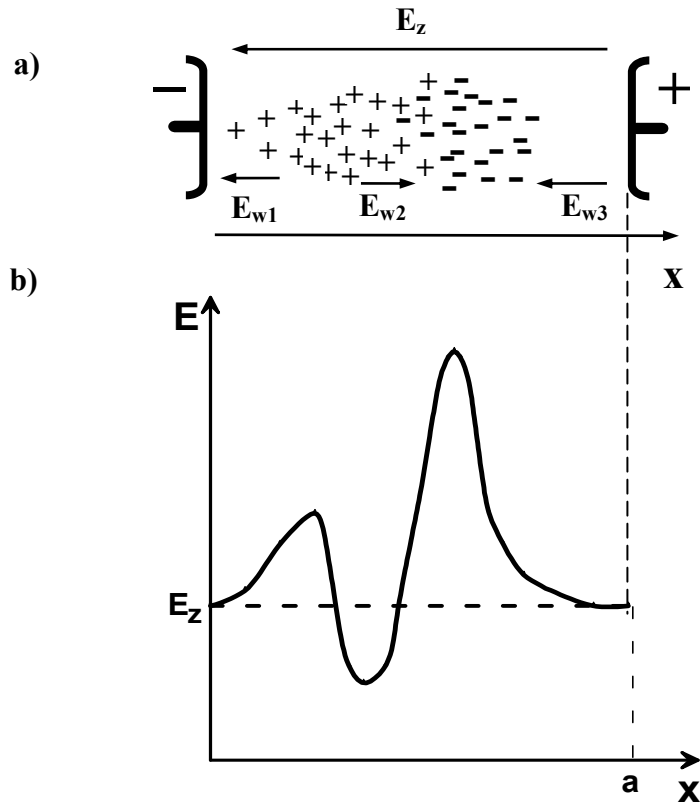
Naturalne promieniowanie jonizujące (kosmiczne lub ziemskie), które oddziałuje w sposób ciągły, powoduje, że w powietrzu zawsze znajduje się niewielka liczba ładunków swobodnych (jonów i elektronów). Na odcinku OA charakterystyka jest liniowa, liczba ładunków docierających do okładzin jest proporcjonalna do przyłożonego napięcia. W tym zakresie obowiązuje prawo Ohma. Po osiągnięciu wartości ( $U_s$ ), następuje stabilizacja, prąd na odcinku AB osiąga stan nasycenia ( $I_s$ ). Dalszy wzrost napięcia, pomimo wzrostu energii kinetycznej cząstek, nie powoduje zwiększenia prądu, ponieważ nie wzrasta liczba ładunków wytwarzanych przez zewnętrzne czynniki jonizujące. Energie cząsteczek nie są wystarczające do uruchomienia mechanizmów jonizacji powietrza. Począwszy od napięcia ( $U_j$ ), elektrony uzyskują prędkości i energie, wystarczające do zapoczątkowania intensywnych procesów jonizacyjnych. Zwiększenie wartości napięcia wywołuje wzrost prądu (odcinek BC) wynikający z jonizacji lawinowej. Wyładowanie ma tu jeszcze charakter wyładowania niesamoistnego. Po osiągnięciu napięcia ( $U_0$ ), wyładowanie zmienia charakter na samoistne (punkt C). Od tego punktu wzrost prądu nie zależy od mechanizmów powstawania naładowanych cząstek, a jedynie od parametrów obwodu elektrycznego. Dalszy rozwój wyładowania może przebiegać według różnych mechanizmów (Townsenda, kanałowego), które opisano w następnych podrozdziałach. Charakterystyka jonizacji jest nieodwracalna, co oznacza, że po przekroczeniu wytrzymałości elektrycznej powietrza następuje przeskok iskry w układzie.

#### 2.4. Mechanizmy rozwoju wyładowań elektrycznych w powietrzu

W zależności od iloczynu odległości międzyelektrodowej i ciśnienia gazu ( $a \cdot p$ ), procesy powstawania i rozwoju wyładowań elektrycznych można wyjaśnić na podstawie następujących mechanizmów: wyładowań lawinowych i kanałowego. Mechanizm wyładowań lawinowych obowiązuje dla iskier krótkich i układów, dla których iloczyn ( $a \cdot p$ ) przyjmuje wartości w zakresie ( $0,5-10^3$ ) Pa·m. Mechanizm ten wynika z teorii Townsenda i jest oparty na lawinowym wzroście liczby elektronów w wyniku przestrzennej i powierzchniowej jonizacji zderzeniowej. Mechanizm kanałowy wg teorii Raethera i Meeka występuje przy dużych wartościach iloczynu ( $a \cdot p$ ) (powyżej  $10^3$  Pa·m), czyli przy iskrach długich. W tym przypadku na rozwój wyładowania ma wpływ zarówno jonizacja zderzeniowa, jak również inne procesy jonizacyjne (fotjonizacja, termojonizacja).

W obydwu mechanizmach podstawowym elementem warunkującym rozwój wyładowania jest wystąpienie lawin elektronowych, w których zachodzi gwałtowny wzrost liczby elektronów. Rozkład ładunków w lawinie przedstawiony został na rys. 2.2a. W czole lawiny znajdują się szybkie elektrony,

z kolei w ogonie wolne jony dodatnie. Przy niewielkich odstępach między elektrodami (mechanizm Townsenda) ładunek przestrzenny jest zbyt mały i nie wpływa w istotny sposób na rozkład pola elektrycznego. Jeżeli odległości międzyelektrodowe są duże (mechanizm kanałowy), ładunek przestrzenny w lawinie jest przyczyną powstawania lokalnych pól wewnętrznych i zniekształcenia pola pierwotnego (rys. 2.2b).

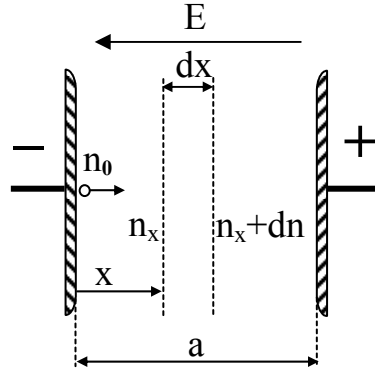


**Rys. 2.2.** Wpływ ładunku przestrzennego na nierównomierność pola elektrycznego: (a) rozkład ładunków w lawinie elektronowej w polu jednostajnym, (b) rozkład natężenia pola elektrycznego;  $E_z$  – natężenie zewnętrznego pola elektrycznego,  $E_w$  – pole wywołane ładunkiem przestrzennym,  $a$  – odległość między elektrodami

Mechanizm rozwoju wyładowania zupełnego wg teorii Townsenda wymaga przyjęcia następujących założeń:



- uwzględnia się tylko jonizację zderzeniową bezpośrednią, która zachodzi, gdy  $W_e \geq W_j$ ;
- w każdym zderzeniu elektron traci całą swoją energię kinetyczną,
- zakłada się, że tor elektronu jest prostoliniowy.



**Rys. 2.3.** Przyrost liczby elektronów  $dn$  na drodze  $dx$

W wyniku oddziaływania czynników zewnętrznych w pobliżu katody wyzwanych jest  $n_0$  elektronów. Przyrost elektronów na skutek jonizacji na drodze  $dx$  wynosi:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx, \quad (2.8)$$

gdzie:

$\alpha$  - współczynnik jonizacji elektronowej, wyrażający liczbę zderzeń jonizacyjnych jednego elektronu na drodze 1cm, w kierunku przeciwnym do kierunku zewnętrznego pola elektrycznego.

Po przekształceniu zależności (2.8) otrzyma się [15]:

$$\frac{dn}{n} = \alpha \cdot dx. \quad (2.9)$$

Przy założeniu, że pole jest jednostajne ( $\alpha = \text{const}$ ) i obustronnym scałkowaniu wyrażenia (2.9) [15]:

$$\int_{n_0}^{n_x} \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha \cdot dx. \quad (2.10)$$

Liczba elektronów w odległości  $x$  od katody:

$$n_x = n_0 \cdot e^{\alpha x}. \quad (2.11)$$

Po podstawieniu  $x=a$ , liczba docierających do anody elektronów wynosi:

$$n_a = n_0 \cdot e^{\alpha a}. \quad (2.12)$$

Równocześnie powstają jony dodatnie, ich liczbę można obliczyć jako:

$$n_j = n_a - n_0 = n_0 \cdot e^{\alpha a} - n_0 = n_0 (e^{\alpha a} - 1). \quad (2.13)$$

Docierając do katody, jony wyzwalają z niej  $n_k$  elektronów:

$$n_k = n_j \cdot \gamma = \gamma \cdot n_0 (e^{\alpha a} - 1), \quad (2.14)$$

gdzie:

$\gamma$  - współczynnik jonizacji powierzchniowej, wyrażający efektywność emisji elektronów z katody, zależny od materiału, z którego jest wykonana i od dielektryka gazowego (przykładowo dla powietrza i miedzi wynosi: 0,025).

Warunkiem przejścia wyładowania niesamoistnego w samoistne w polu jednorodnym jest, aby z katody wyzwolonych zostało co najmniej  $n_0$  elektronów:

$$\gamma \cdot n_0 (e^{\alpha a} - 1) \geq n_0. \quad (2.15)$$

Wzór (2.15) można również przedstawić w postaci [15]:

$$\gamma (e^{\alpha a} - 1) \geq 1. \quad (2.16)$$

Wartość współczynnika  $\gamma$ , zależy od materiału katody i od obecności na jej powierzchni warstw tlenkowych, obniżających efektywność jonizacji powierzchniowej.

Przy dużych wartościach iloczynu ( $a \cdot p$ ) rozwój wyładowania może zachodzić według mechanizmu kanałowego. Pojawiający się ładunek przestrzenny wpływa na zniekształcenie pierwotnego pola elektrycznego (rys. 2.2b). Następstwem jest nasilenie się jonizacji zderzeniowej w lawinie oraz zapoczątkowanie fotojonizacji wokół niej. Zjawisko fotojonizacji prowadzi do tworzenia się lawin wtórnych, które przy dostatecznie dużym polu, wzmocnionym przez ładunek przestrzenny, są wciągane w obszar lawiny pierwotnej. Rośnie liczba ładunków i temperatura gazu, spowodowane zderzeniami sprężystymi, co jest czynnikiem sprzyjającym przekształceniu się lawiny pierwotnej w kanał plazmowy, tzw. strimer. Jest to silnie zjonizowany

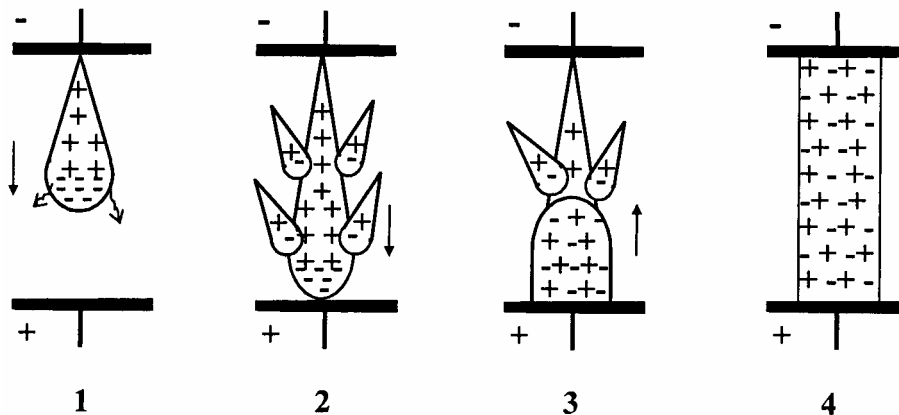
kanal, wypełniony elektronami i jonami dodatnimi. Warunkiem rozwoju strimera jest osiągnięcie w czole lawiny krytycznej liczby elektronów  $n_k$ :

$$n_k = n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot x_k), \quad (2.17)$$

gdzie:

$x_k$  – krytyczna długość lawiny.

Szacuje się, że dla jednego elektronu, na drodze krytycznej dochodzi do (18-20) zderzeń jonizacyjnych, co skutkuje osiągnięciem w lawinie  $n_k \approx (10^7 - 10^8)$  elektronów. Charakter rozwoju wyładowania strimerowego jest uzależniony zarówno od rozkładu pola elektrycznego między elektrodami, jak również od wartości i szybkości narastania napięcia. Przykładowe etapy rozwoju strimera w układzie o polu jednorodnym ( $a > x_k$ ) obrazuje rys. 2.4.



**Rys. 2.4.** Kolejne fazy rozwoju wyładowania według mechanizmu kanałowego:  
1 - lawina pierwotna, 2 – powstawanie lawin wtórnych, 3 - anodowy kanał plazmowy, 4 - kanałowe wyładowanie zupełne

W tym przypadku strimer rozwija się dopiero po dojściu lawiny pierwotnej do anody. Dla bardzo silnych pól, bądź bardzo dużych wartości  $a$ , strimer może tworzyć się w czole lawiny pierwotnej, po osiągnięciu przez nią długości krytycznej. Następuje wówczas łączenie się lawiny pierwotnej z wyprzedzającymi ją lawinami wtórnymi. Zjawisko to jest przyczyną znacznie szybszego rozwoju wyładowania w porównaniu z mechanizmem Townsenda. Wyprzedzanie lawiny pierwotnej przez lawiny wtórne jest możliwe dzięki znacznie większej prędkości fotonów ( $3 \cdot 10^{10}$  cm/s) w porównaniu z elektronami ( $10^7$  cm/s).

## 2.5. Charakterystyka Paschena

Wyładowanie jest samoistne, jeżeli w procesach jonizacyjnych w obszarze wyładowania wyzwolona zostanie co najmniej taka sama liczba elektronów, jaka z niego znika. Na podstawie przekształconego warunku Townsenda (2.16) można wyznaczyć za pomocą zależności (2.18) minimalną liczbę zderzeń jonizacyjnych jednego elektronu, która to zapewni:

$$\alpha \cdot a = \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right). \quad (2.18)$$

W warunkach normalnych ( $p = 1013 \text{ hPa}$ ,  $t = 20^\circ\text{C}$ ) w powietrzu liczba ta mieści się w granicach (18-20). Współczynnik jonizacji  $\alpha$  zależy od ciśnienia gazu oraz natężenia pola elektrycznego i może być określony wzorem:

$$\alpha = A \cdot b \cdot \exp \left( \frac{-B \cdot p}{E_0} \right), \quad (2.19)$$

gdzie:

- A, B – współczynniki zależne od rodzaju gazu i jego temperatury,
- $E_0$  – natężenie początkowe wyładowań,
- p – ciśnienie.

Po przekształceniu równania 2.18 i przyrównaniu do wzoru 2.19, otrzymuje się zależność:

$$\frac{1}{a} \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) = A \cdot b \cdot \exp \left( \frac{-B \cdot p}{E_0} \right). \quad (2.20)$$

Po uwzględnieniu zależności na natężenie pola elektrycznego (2.21) dla układu elektrod płaskich:

$$E_0 = \frac{U_0}{a}, \quad (2.21)$$

gdzie:

- $U_0$  – napięcie początkowe wyładowań samoistnych,
- a – odległość między elektrodami,

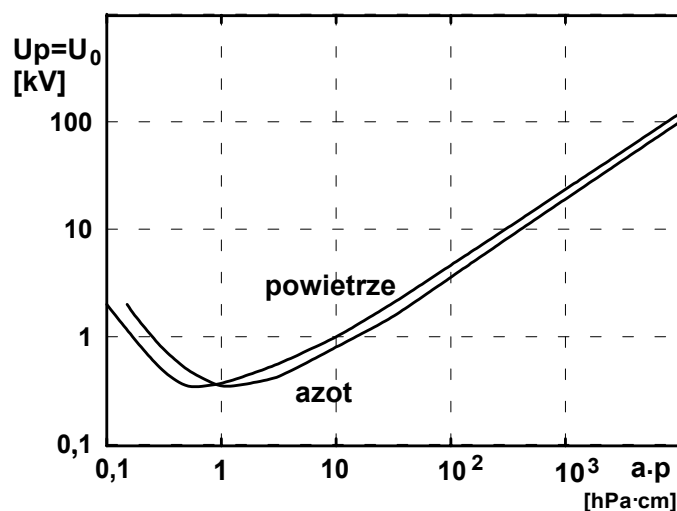
i odpowiednim przekształceniu wzoru 2.20, można określić napięcie początkowe wyładowań samoistnych ( $U_0$ ), które w polu równomiernym jest równe napięciu przebicia ( $U_p$ ) i wyraża się jako:

$$U_0 = U_p = \frac{B \cdot b \cdot a}{\ln \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{\gamma}} \right)} \quad (2.22)$$

Powyższy wzór stanowi matematyczne ujęcie prawa Paschena, według którego napięcie początkowe wyładowań  $U_0$  (dla danego gazu i materiału elektrod) przy stałej temperaturze jest zależne jedynie od iloczynu odległości międzyelektrodowej  $a$  i ciśnienia  $p$ . Zależność  $U_0 = f(a \cdot p)$  można przedstawić w formie graficznej jako charakterystykę Paschena (rys. 2.5). Krzywa Paschena ma podobny przebieg, niezależnie od rodzaju gazu. Przy założeniu stałej odległości międzyelektrodowej  $a$ , z krzywej Paschena wynika, że wzrost napięcia początkowego  $U_0$  ( $U_p$ ), a więc wzrost wytrzymałości elektrycznej można osiągnąć dwoma sposobami: wytwarzając w układzie bardzo niskie ciśnienie (próżnię) lub przeciwnie - stosując w układzie ciśnienie wysokie. Fizyczna interpretacja zjawiska wzrostu wytrzymałości w obu wymienionych przypadkach jest różna. W obszarze odpowiadającym próżni, liczba cząstek podlegających jonizacji jest niewielka. Im wyższa próżnia, tym mniejsza liczba cząstek. Ponieważ koncentracja cząstek jest mała, to drogi swobodne elektronów są długie, prędkość i energia kinetyczna rosną - a zatem prawie wszystkie zderzenia mają charakter jonizacyjny. Jednak prawdopodobieństwo zderzeń jest niewielkie i to decyduje o wzroście wytrzymałości. W obszarze podwyższonego ciśnienia koncentracja cząstek gazu jest duża i w związku z tym prawdopodobieństwo zderzeń wysokie. Jednak ich drogi swobodne są krótkie, a zatem małe są prędkości i w konsekwencji mała energia kinetyczna. W efekcie większość zderzeń ma charakter niejonizacyjny i to stanowi przyczynę wzrostu wytrzymałości gazu. Dla każdego gazu istnieje taka wartość iloczynu ( $a \cdot p$ ), dla którego krzywa Paschena osiąga minimum. Współrzędne tego minimum mogą być określone matematycznie za pomocą zależności (2.23).

$$\frac{dU_0}{d(a \cdot p)} = 0. \quad (2.23)$$

Dla każdego rodzaju gazu, przy zadanej odległości, ciśnieniu i znanym materiale elektrod, można zatem obliczyć minimalne napięcie  $U_0$ . Dla powietrza przy ciśnieniu atmosferycznym minimum charakterystyki  $U_0 = f(a \cdot p)$  występuje dla odległości między elektrodami ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$ ) cm. Odpowiadające tej odległości minimalne napięcie przeskoku wynosi  $U_{0 \min} \cong (300-350)$  V.



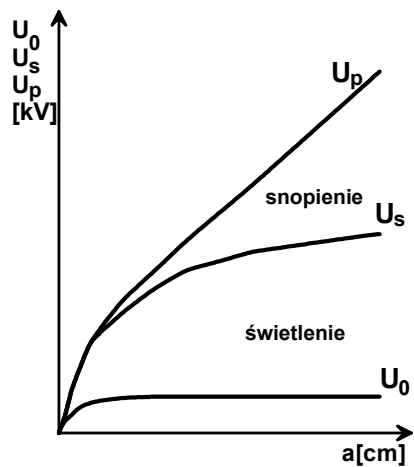
Rys. 2.5. Przebieg krzywych Paschena dla powietrza i azotu w jednostajnym polu elektrycznym ( $U_0 = U_p$ )

## 2.6. Wpływ rozkładu pola elektrycznego na wytrzymałość powietrza

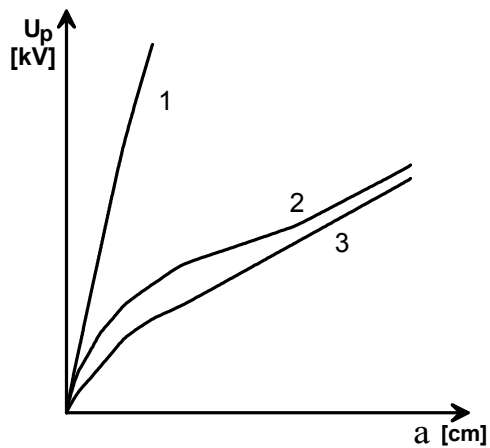
Przez wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego rozumie się jego odporność na przeskok (kończący się wyładowaniem iskrowym lub łukowym) pod wpływem napięcia występującego między elektrodami. Miarą wytrzymałości jest napięcie przebicia ( $U_p$ ), które zależy między innymi od drogi przeskoku ( $a$  - odległość między elektrodami) oraz rozkładu pola elektrycznego.

W technicznych układach izolacyjnych rozkład pola jest najczęściej niejednostajny, co powoduje, że przed przeskokiem dochodzi do wyładowań niepełnych samoistnych, rozpoczynających się przy napięciu początkowym  $U_0$ . Kolejną fazą wyładowań jest snopienie. Wpływ odległości między elektrodami na wartość napięcia początkowego ulotu ( $U_0$ ), napięcia początkowego wyładowań snopiastych ( $U_s$ ) oraz napięcia przebicia ( $U_p$ ) przedstawia rys. 2.6.

Najbardziej wytrzymałe są układy o polu jednostajnym, przeskoki nie jest poprzedzony wyładowaniami niepełnymi. Porównanie wytrzymałości układów izolacyjnych o różnych kształtach elektrod przedstawia rys. 2.7.



Rys. 2.6. Przykładowe zależności napięć ( $U_0$ ), ( $U_s$ ) i ( $U_p$ ) od odległości elektrod  $a$  w polu niejednostajnym (układ ostrze - ostrze)



Rys. 2.7. Zależność napięcia przeskoku od odległości między elektrodami płaskimi (1), kulowymi (2) i ostrzowymi (3)

### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

#### 3.1. Zadania do wykonania

W ramach ćwiczenia należy wykonać następujące pomiary:

1. Wyznaczyć rzeczywistą przekładnię układu probierczego za pomocą iskiernika kulowego.
2. Dla układów: ostrze - ostrze, kula - kula o średnicy  $\phi$  20 mm, ostrze - płyta wyznaczyć zależność napięcia początkowego ulotu ( $U_0$ ), napięcia snopienia ( $U_s$ ) i napięcia przebicia ( $U_p$ ) od odległości  $a$  między elektrodami.
3. Dla układu płyta - płyta wyznaczyć zależność napięcia przebicia ( $U_p$ ) od odległości  $a$  między elektrodami.

#### 3.2. Układy pomiarowe

Pomiary przewidziane do wykonania w ramach ćwiczenia (pkt 3.1.) należy przeprowadzić w celce wysokiego napięcia, w układzie scharakteryzowanym w ćwiczeniu nr 1. Po stronie wysokiego napięcia, za rezystorem ochronnym, należy kolejno podłączyć układy elektrod ostrze - ostrze, kula - kula, ostrze - płyta i płyta - płyta. W każdym z trzech pierwszych układów należy zmieniać odległość między elektrodami, odczytując wartości napięć charakterystycznych:  $U_0$ ,  $U_s$ ,  $U_p$ . Natomiast dla układu płyta - płyta odczytywać wartości napięcia  $U_p$ . Odległości między elektrodami w układach o polu nierównomiernym (punkt 2) należy zmieniać co 2 cm w zakresie (2-14) cm, natomiast w układzie o polu równomiernym (punkt 3) co 0,5 cm w zakresie (0,5-2,5) cm. Pomiary należy wykonać trzykrotnie dla każdej odległości między elektrodami. Przy zmianach połączeń w obwodzie wysokiego napięcia, w każdym przypadku należy zachować szczególną ostrożność, zwracając uwagę na bezpieczne odległości między elementami, które będą znajdować się pod wysokim napięciem a uzziemionymi elementami celki pomiarowej.

#### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Podczas realizacji ćwiczenia należy na bieżąco notować wartości mierzonych napięć charakterystycznych. Oprócz wyników pomiarów, protokół powinien zawierać następujące informacje ogólne: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących ćwiczenie, datę wykonywania ćwiczenia, ciśnienie i temperaturę powietrza panującą podczas wykonywania ćwiczenia, dane znamionowe przyrządów wykorzystywanych w ćwiczeniu, uwagi i spostrzeżenia przydatne



przy opracowywaniu sprawozdania. Protokół z wynikami pomiarów powinien być potwierdzony podpisem przez prowadzącego ćwiczenie.

Przykładowe tabele pomiarowe:

**Tabela 2.1.**

Układ pomiarowy ostrze – ostrze (kula – kula, ostrze- płyta)

Lp.	a [cm]	$U_0$ [V]	$U_{0s\acute{r}}$ [V]	$U_0$ [kV]	$U_{0n}$ [kV]	$U_s$ [V]	$U_{s\acute{r}}$ [V]	$U_{sn}$ [kV]	$U_p$ [V]	$U_{p\acute{r}}$ [V]	$U_{pn}$ [kV]
1											
2											
3											

**Tabela 2.2.**

Układ pomiarowy płyta - płyta

Lp.	a [cm]	$U_{sn}$ [kV]	$U_p$ [V]	$U_{p\acute{r}}$ [V]	$U_{pn}$ [kV]	$E_p$ [kV/cm]
1						
2						
3						

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonywanego ćwiczenia należy przygotować sprawozdanie, jedno dla całej sekcji realizującej pomiary. Powinno ono zawierać dane osób wykonujących ćwiczenie i podstawowe dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto sprawozdanie powinno obejmować:

- krótki wstęp teoretyczny dotyczący ćwiczenia - nie więcej niż jedną stronę,
- tablicę z wynikami pomiarów i wartościami przeliczonymi na warunki normalne,
- wykres rzeczywistej przekładni wyznaczonej za pomocą iskiernika kulowego,
- wykres zależności  $U_0$ ,  $U_s$ ,  $U_p$  w funkcji odległości między elektrodami a dla układów: ostrze - ostrze, kula - kula, ostrze - płyta,
- wykres zależności  $U_p$  oraz  $E_p$  w funkcji odległości między elektrodami  $a$  dla elektrod typu płyta - płyta,
- wykres porównawczy zależności  $U_p$  w funkcji odległości między elektrodami dla wszystkich badanych układów elektrod.

Ponadto sprawozdanie powinno zawierać analizę uzyskanych wyników i wnioski wynikające z pomiarów.

## 5. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Omówić czynniki wpływające na wytrzymałość powietrza.
2. Wymienić i objaśnić mechanizmy jonizacji powietrza.
3. Wymienić i objaśnić procesy dejonizacji powietrza.
4. Narysować i wyjaśnić charakterystykę jonizacji.
5. Wpływ ładunku przestrzennego w lawinie elektronowej na rozkład pola elektrycznego.
6. Warunek Townsenda rozwoju wyładowania samodzielnego.
7. Kanałowy mechanizm przebicia gazów.
8. Zależność napięcia początkowego wyładowań  $U_0$  od iloczynu ciśnienia gazu i odległości między elektrodami.
9. Prawo Paschena i jego fizykalna interpretacja.
10. Zależność napięć  $U_0$ ,  $U_s$ ,  $U_p$  od odległości między elektrodami w polu niejednostajnym.
11. Różnice w mechanizmie rozwoju wyładowań w polu jednostajnym i niejednostajnym.

### LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:

4, 5, 6, 7, 8, 9, 15, 18, 27, 29, 31.

## Ćwiczenie nr 4

# WYTRZYMAŁOŚĆ POWIETRZA PRZY NAPIĘCIU STAŁYM

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z wytrzymałością elektryczną powietrza i mechanizmami jego przebicia przy napięciu stałym. Zakres teoretyczny ćwiczenia obejmuje także tematykę prób napięciowych wykonywanych napięciem stałym, charakterystykę źródeł wysokiego napięcia stałego, w tym wykorzystania układów prostownikowych, jak również omówienie metod pomiaru wysokiego napięcia stałego.

### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

#### 2.1. Znaczenie wysokiego napięcia stałego w badaniach dielektryków

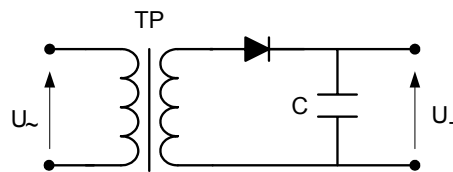
Napięcie stałe jest wykorzystywane w technice probierczej przede wszystkim do przeprowadzania prób napięciowych. Wykonywanie prób napięciowych napięciem stałym jest uzasadnione zawsze wtedy, kiedy badane urządzenie w normalnych warunkach eksploatacyjnych jest zasilane takim napięciem. Także w urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych posiadających znaczną pojemność, ich próbę napięciową wygodniej jest przeprowadzić napięciem stałym. Przykładami takich obiektów są kable elektroenergetyczne i kondensatory. Wykonywanie próby napięciowej napięciem stałym, a nie napięciem przemiennym, jest także uzasadnione wówczas, gdy w badanym urządzeniu występują intensywne wyładowania niezupełne. Próba napięciowa takich urządzeń napięciem stałym stwarza dla ich izolacji mniejsze zagrożenie. Wykonywanie próby napięciowej różnych urządzeń napięciem stałym jest również korzystne pod względem metrologicznym - poprzez prosty pomiar prądu upływnościowego lub rezystancji, można ocenić stan ich izolacji.

Poza wymienionymi próbami napięciowymi wysokie napięcie stałe jest wykorzystywane do zasilania dużych instalacji technologicznych, np. elektrofiltrów, akceleratorów cząstek, generatorów udarowych, urządzeń rentgenowskich i innych.

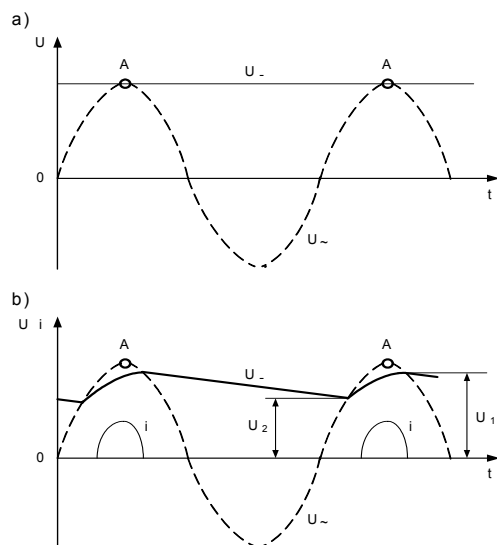
Analiza zjawisk przedprzebiegowych i mechanizmu przebiecia powietrza przy zasilaniu układów z polem silnie niejednostajnym napięciem stałym, jest także przydatna ze względów dydaktycznych: teoretyczne określenie oddziaływania ładunku przestrzennego na napięcie  $U_0$  – napięcie początkowe ulotu i  $U_p$  – napięcie przebiecia, w zależności od biegunowości elektrod, znajduje bardzo wyraźne potwierdzenie fizyczne podczas wykonania przez studentów pomiarów w laboratorium.

## 2.2. Źródła wysokich napięć stałych

Źródłem wysokich napięć stałych są najczęściej zespoły probiercze wysokiego napięcia stałego. Normalnie składają się one z regulatora, transformatora probierczego i układu prostowników wysokiego napięcia. Najprostszy, jednoprostownikowy układ do wytwarzania napięcia stałego przedstawiono na rys. 4.1. Natomiast na rys. 4.2 przedstawiono przebiegi napięcia wyprostowanego w tym układzie.



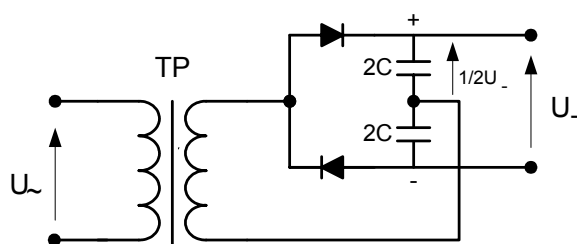
Rys. 4.1. Schemat jednoprostownikowego układu do generacji wysokiego napięcia stałego



**Rys. 4.2.** Przebiegi napięcia w układzie jednoprostownikowym a) w stanie ustalonym, w układzie bez strat, b) w układzie ze stratami,  $U_{\sim}$  - napięcie przemiennie,  $U_{-}$  - przebieg napięcia wyprostowanego

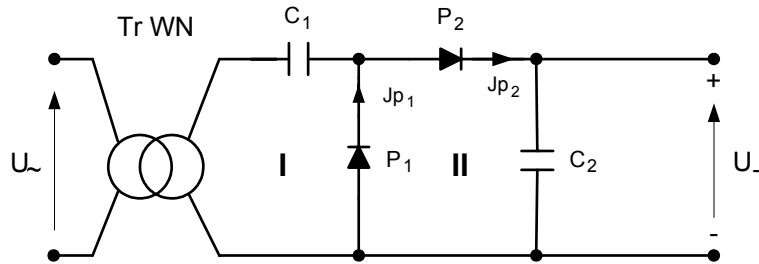
Większe znaczenie w generacji wysokiego napięcia stałego mają układy dwuprostownikowe. W technice wysokich napięć jest rozpowszechniony układ dwuprostownikowy, którego schemat przedstawiono na rys. 4.3. W układzie przedstawionym na rys. 4.3, każda z gałęzi ma prostowanie półokresowe, natomiast napięcie wyjściowe z całego układu ma prostowanie pełnokresowe. Układ ten umożliwia uzyskanie na wyjściu napięcia stałego o podwójnej wartości w stosunku do maksymalnej wartości napięcia przemiennego:

$$U_{-} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\sim} \quad (4.1)$$



**Rys. 4.3.** Schemat układu dwuprostownikowego z mnożnikiem napięciowym 2

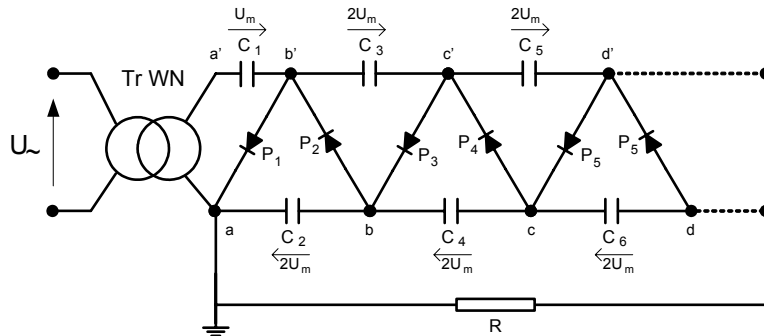
W przypadkach, kiedy nie dysponuje się transformatorem probierczym na bardzo wysokie napięcie, do otrzymywania wysokiego napięcia stałego można stosować układy powielające. Są one zbudowane z transformatora wysokiego napięcia, odpowiednich układów prostowników i kondensatorów. Schemat przykładowego, niesymetrycznego powielacza napięcia stałego przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Schemat niesymetrycznego powielacza napięcia stałego [6]

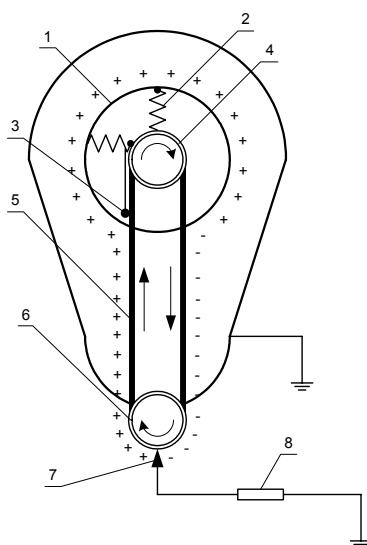
W pierwszym oczku (I) układu (rys. 4.4) następuje powtarzające się ładowanie i rozładowanie kondensatora  $C_1$ . W drugim oczku (II) podobnie ładuje się kondensator  $C_2$ . Prądy  $J_{p1}$  oraz  $J_{p2}$  w obu oczkach mają jednakowe wartości, a zatem obydwie kondensatory pracują w takich samych warunkach. Napięcie stałe na wyjściu układu jest sumą napięć na obu kondensatorach.  $N$ -krotne powielenie napięcia stałego na wyjściu można osiągnąć przez dodanie do układu kolejnych  $n$  kondensatorów, ładowanych przez odpowiednie układy prostowników.

Inną możliwość uzyskania wysokiego napięcia stałego dają układy kaskadowe. Schemat kaskadowego generatora napięcia stałego przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Schemat kaskadowego generatora napięcia stałego

Źródłem wysokiego napięcia stałego o małej mocy mogą być generatory elektrostatyczne. Najbardziej znane generatory tego typu są wykonywane według idei Van de Graaffa oraz idei Feliciego. Schemat elektrostatycznego generatora Van de Graaffa przedstawiono na rys. 4.6. W generatorze, którego schemat przedstawiono na rys. 4.6, ładunek elektryczny jest dostarczany do elektrody wysokonapięciowej wykonanej w formie kuli (1) poprzez pas wykonany z materiału izolacyjnego (5). Zasilanie (8) generatora stanowi transformator wysokiego napięcia i układ prostowników. Z układu zasilania (8), do dolnej elektrody ulotowej (7), dostarczane są dodatnie ładunki transmitowane pasem (5), do górnej elektrody zbiorczej (3). Generatory elektrostatyczne, ze względu na małą moc, są wykorzystywane głównie w laboratoriach fizycznych i do celów dydaktycznych.

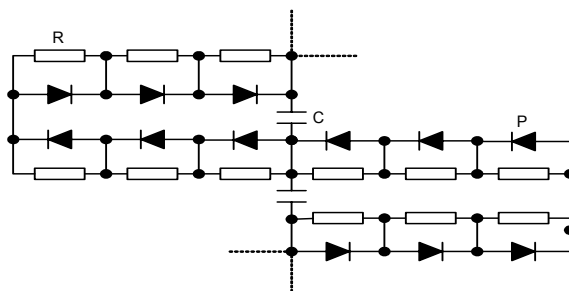


**Rys. 4.6.** Schemat elektrostatycznego generatora Van de Graaffa:

- 1 - elektroda wysokiego napięcia, 2 - górna elektroda ulotowa, 3 - elektroda zbiorcza,  
 4 - koło pasowe izolowane od elektrody, 5 - pas transmisyjny, 6 - koło napędzające,  
 7 - dolna elektroda ulotowa, 8 - zasilanie generatora [6]

### 2.3. Układy prostownikowe

W układach wytwarzających wysokie napięcie stałe, podstawowymi elementami są prostowniki lub układy prostownicze. Mogą one być wykonywane jako prostowniki mechaniczne, lampowe lub półprzewodnikowe.



**Rys. 4.7.** Schemat półprzewodnikowego prostownika wysokiego napięcia.  
 R - rezystory wyrównujące rozkład napięcia na elementach półprzewodnikowych w kierunku zaporowym; C - pojemności zabezpieczające prostownik przed działaniem przepięć szybkozmiennych

Prostownikami o największym znaczeniu i najszerszym zastosowaniu są aktualnie prostowniki półprzewodnikowe (rys. 4.7). Wysokonapięciowe diody krzemowe mogą być łączone łańcuchowo lub występować pojedynczo. Prostowniki tego typu charakteryzują małe wymiary, wysokie napięcie zwrotne i duży prąd przewodzenia. Diody łączone szeregowo są umieszczane w rurach izolacyjnych i zalewane olejem lub żywicą.

## 2.4. Metody pomiaru wysokiego napięcia stałego

Do pomiarów wysokiego napięcia stałego mogą być stosowane iskierniki kulowe, woltomierze elektrostatyczne, układy z szeregowo włączonym rezystorem wzorcowym i mikroamperomierzem oraz woltomierze wirujące. Iskiernikowe metody pomiaru wysokiego napięcia oraz metody z wykorzystaniem woltomierza elektrostatycznego zostały opisane w ćwiczeniu nr 1. Prócz wymienionych wyżej metod do pomiaru napięć stałych o wartości większej od 150 kV, można stosować iskierniki prętowe. Niepewność pomiaru wykonywanego za ich pomocą można ocenić na  $\pm 3\%$ .

Określenie wysokiego napięcia stałego z pomiaru napięcia zasilania układu daje tylko wartość szacunkową. Wynik takiego przeliczenia jest obarczony znacznym błędem wynikającym z nierównomiernego obciążenia transformatora prądem ładowania, który powoduje na rezystancji wewnętrznej i prostowniku spadek napięcia. Nie można zatem z przekładni transformatora probierczego, określać wartości wysokiego napięcia stałego, w układzie z prostownikiem włączonym po stronie wysokiego napięcia.



## 2.5. Wytrzymałość powietrza przy napięciu stałym

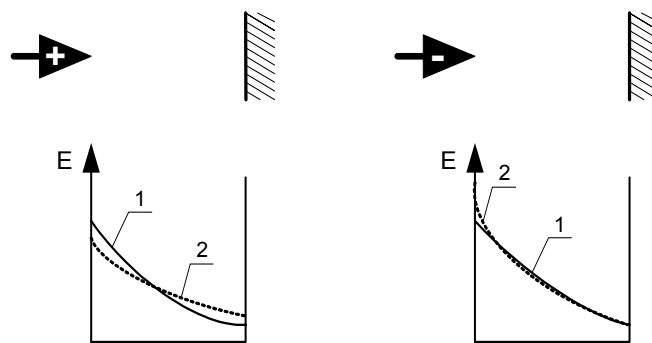
Wytrzymałość powietrza przy napięciu stałym bardzo wyraźnie zależy od biegunowości potencjału elektrody. Wpływ biegunowości uwidacznia się szczególnie w polach silnie niejednostajnych, odwzorowywanych układem ostrze-płyta. Na rys. 4.8 przedstawiono szkic takiego układu przy różnej biegunowości elektrod, z odpowiadającym im w obu przypadkach rozkładem pola. Niezależnie od biegunowości przyłożonego napięcia, natężenie pola przy elektrodzie ostrzowej jest znacznie wyższe niż w pozostałym obszarze między elektrodami. Występuje tutaj analogia do rozkładu pola w takim układzie przy napięciu przemiennym. Przy podwyższaniu napięcia zasilającego elektrody, na ostrzu pojawia się wyładowanie ulotowe, jonizujące powietrze wokół ostrza. Ponieważ elektrony są lekkie i bardziej ruchliwe, zostają one wychwycone w pierwszej kolejności - w ten sposób wokół ostrza powstaje przewaga dodatniego ładunku przestrzennego. Wytwarza on własne pole elektryczne, które nakłada się na pierwotne pole elektryczne istniejące w układzie na skutek napięcia zasilającego elektrody.

Kiedy elektroda ostrzowa jest dodatnia, pole wytwarzane przez ładunek przestrzenny osłabia wypadkowe pole wokół ostrza, a wzmacnia je na pozostałym odcinku drogi międzyelektrodowej (rys. 4.8. krzywa 1). W przypadku ostrza dodatniego warunki rozwoju lawin i strimerów są znacznie korzystniejsze niż dla ostrza o potencjale ujemnym. Kiedy ostrze jest ujemne, pole wytwarzane przez ładunek przestrzenny wzmacnia wypadkowe pole wokół ostrza i osłabia je w pozostałym obszarze (rys. 4.8. krzywa 2). Takie oddziaływanie ładunku przestrzennego powoduje, że napięcie początkowe wyładowań  $U_0$ , jest przy dodatnim ostrzu wyższe niż przy ostrzu ujemnym:

$$U_0^+ > U_0^- \quad (4.2)$$

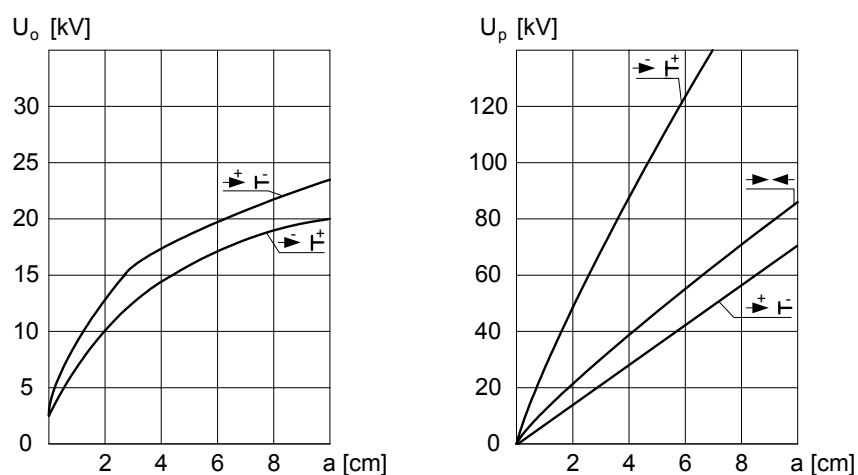
Przy dalszym wzroście napięcia zasilania elektrod, następuje rozwój wyładowań aż do wystąpienia przeskoku. W przypadku ostrza dodatniego, pole od ładunku przestrzennego ułatwia rozwój wyładowania zupełnego, w przypadku ostrza ujemnego pole wypadkowe w układzie jest bardziej wyrównane i w ten sposób rozwój wyładowania zupełnego jest utrudniony:

$$U_p^+ < U_p^- \quad (4.3)$$



**Rys. 4.8.** Szkic układów ostrze- płyta zasilanych napięciem stałym: 1 - rozkład pola w przestrzeni międzyelektrodowej bez ładunków przestrzennych, 2 - rzeczywisty rozkład pola między elektrodami, zmodyfikowany obecnością ładunków przestrzennych

Zmiany początkowego napięcia ulotu  $U_o$  i napięcia przeskoku  $U_p$  w zakresie odległości makroskopowych dla układu ostrze- płyta i układu ostrze- ostrze przy różnych biegunowościach elektrod przedstawiono na rys. 4.9. W niesymetrycznym układzie wysokonapięciowym, kiedy elektrody mają jednakowy kształt (np. ostrze- ostrze), wpływ biegunowości elektrod uwidacznia się w mniejszym stopniu. Asymetria pola elektrycznego w układzie powstaje wówczas na skutek oddziaływania ziemi i elementów uziemionych.



**Rys. 4.9.** Zależności napięcia początkowego ulotu  $U_o$  (a) i napięcia przeskoku  $U_p$  (b), od odległości między elektrodami dla układów ostrze- płyta, ostrze- ostrze, przy różnej biegunowości elektrod [16]

### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

#### 3.1. Zadania do wykonania

W ramach ćwiczenia należy wykonać następujące pomiary:

1. Określić maksymalną dopuszczalną wartość napięcia probierczego ze względu na napięcie wsteczne prostownika oraz typ układu prostującego.
2. Wyznaczyć zależność napięcia stałego, obliczonego ze wskazań mikroamperomierza oraz wartości oporu dzielnika rezystancyjnego, od napięcia zasilania transformatora probierczego.
3. W układzie elektrod ostrze- płyta wyznaczyć napięcie początkowe  $U_o$  i napięcie przeskoku  $U_p$  przy ostrzu dodatnim, w zakresie odległości od 1 cm do 8 cm, co 1 cm (napięcie zmierzyć 3-krotnie dla każdej z odległości).
4. W układzie elektrod ostrze- płyta wyznaczyć napięcie początkowe  $U_o$  i napięcie przeskoku  $U_p$  przy ostrzu ujemnym, w zakresie odległości od 1 cm do 3,5 cm, co 0,5 cm (napięcie zmierzyć 3-krotnie dla każdej z odległości).
5. W układzie elektrod ostrze- ostrze wyznaczyć napięcie początkowe ulotu  $U_o$  i napięcie przeskoku  $U_p$  przy ostrzu ujemnym, w zakresie odległości od 1 cm do 8 cm, co 1 cm (napięcie zmierzyć 3-krotnie dla każdej z odległości).
6. W układzie elektrod ostrze- ostrze wyznaczyć napięcie początkowe ulotu  $U_o$  i napięcie przeskoku  $U_p$  przy ostrzu dodatnim, w zakresie odległości od 1 cm do 8 cm, co 1 cm (napięcie zmierzyć 3-krotnie dla każdej z odległości).
7. W układzie elektrod kula- kula wyznaczyć napięcie przeskoku  $U_p$  przy uziemionej kuli dodatniej, w zakresie odległości 1 cm do 6 cm, co 1 cm (napięcie zmierzyć 3-krotnie dla każdej z odległości).
8. W układzie elektrod kula- kula wyznaczyć napięcie przeskoku  $U_p$  dla uziemionej kuli ujemnej, w zakresie odległości od 1 cm do 6 cm, co 1 cm (napięcie zmierzyć 3-krotnie dla każdej z odległości).
9. Dla każdego z pomiarów wyznaczyć wartość współczynnika tętnień, określonego wzorem 4.4.

$$w = \frac{U_{\mu A}}{U} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

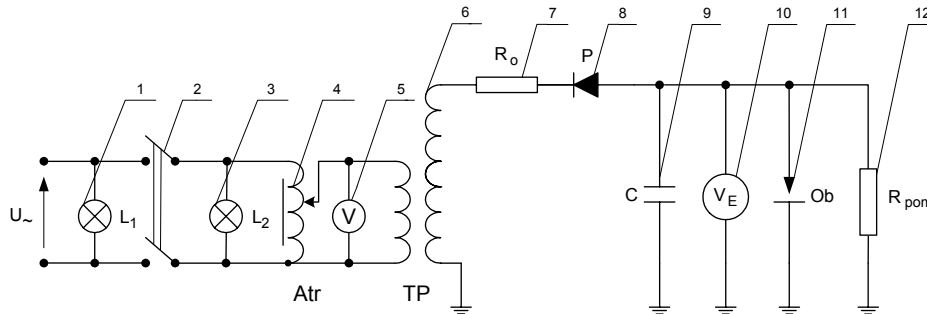
$$U = U_{zas} \cdot 500 \cdot \sqrt{2} \quad (4.5)$$

gdzie:  $U_{\mu A}$  – napięcie wyznaczone z iloczynu wartości mierzonego prądu oraz rezystancji rezystora bocznikującego,  $U_{zas}$  – wartość skuteczna napięcia zasilającego stronę nN układu pomiarowego.

### 3.2. Układy pomiarowe

Pomiary należy wykonać w typowej celce laboratorium TWN, w niesymetrycznym układzie wysokonapięciowym. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.10.

Przed rozpoczęciem pomiarów należy połączyć układ według schematu przedstawionego na rys. 4.10. Jako badane obiekty (11), należy kolejno podłączać iskierniki ostrze- płyta, ostrze-ostrze, kula-kula, realizując pomiary według programu przedstawionego w punkcie 3.1. Dla każdego odstepu elektrod należy wykonać po trzy pomiary. Napięcie po stronie niskiego napięcia należy podwyższać równomiernie, z prędkością około 2 kV na sekundę. Podczas wykonywania pomiarów należy zachowywać szczególną ostrożność przy łączeniu w układzie kondensatora pamiętając, że może on być naładowany. Wejście do celki pomiarowej musi być każdorazowo poprzedzone rozładowaniem kondensatora uziemieniem przenośnym.



**Rys. 4.10.** Schemat układu do pomiarów wytrzymałości powietrza przy napięciu stałym.  
1, 3 - lampki kontrolne sygnalizujące obecność napięcia, 2 - wyłącznik napięcia,  
4 - autotransformator, 5 - woltomierz mierzący napięcie na autotransformatorze,  
6 - transformator probierczy, 7 - rezystor ochronny, 8 - zespół prostowniczy,  
9 - wysokonapięciowy kondensator wygładzający, 10 - woltomierz elektrostatyczny,  
11 - iskierniki o zadanej geometrii elektrod, 11 - rezystor pomiarowy

### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Protokół z ćwiczenia powinien zawierać wyniki pomiarów realizowanych według programu przedstawionego w punkcie 3.1. W protokole winny być ujęte następujące wyniki:

- pomiarów napięcia  $U_o$  i  $U_p$ , dla obu biegunowości elektrod ostrze- płyta, przy różnych odległościach międzyelektrodowych,
- pomiarów napięcia  $U_o$  i  $U_p$  dla obu biegunowości elektrod ostrze- ostrze, przy różnych odległościach międzyelektrodowych,
- pomiarów napięcia  $U_p$  dla obu biegunowości elektrod kula- kula, przy różnych odległościach międzyelektrodowych.

Poza wymienionymi wynikami, charakterystycznymi dla realizowanego ćwiczenia, w protokóle winny być ujęte ogólne informacje dotyczące pomiarów, a mianowicie: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących ćwiczenie, data wykonywania ćwiczenia, ciśnienie i temperatura powietrza panujące podczas wykonywania ćwiczenia, dane znamionowe przyrządów wykorzystywanych w pomiarach oraz uwagi i spostrzeżenia przydatne przy opracowywaniu sprawozdania.

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonanego ćwiczenia należy opracować sprawozdanie, jedno dla całej sekcji realizującej ćwiczenie. Sprawozdanie winno zawierać dane osób wykonujących ćwiczenie i podstawowe dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto w sprawozdaniu należy ująć:

- bardzo krótką teorię dotyczącą ćwiczenia (nie więcej niż jedna strona), tablicę z wynikami wszystkich zrealizowanych podczas laboratorium pomiarów, przeliczonych na warunki normalne,
- wykresy zależności napięcia początkowego  $U_o$  i napięcia przeskoku  $U_p$  w funkcji odległości między elektrodami ostrze- płyta, dla obu biegunowości elektrod,
- wykresy zależności napięcia  $U_o$  i  $U_p$  w funkcji odległości między elektrodami ostrze - ostrze, dla obu biegunowości elektrod, wykresy zależności napięcia  $U_p$  w funkcji odległości między elektrodami kula- kula, dla obu biegunowości elektrod,
- wykres zależności  $U_{\mu A} = f(U_{zas})$  wg. pomiarów zamieszczonych w tabeli pomiarowej 4.1. Charakterystykę należy aproksymować linią prostą, podając jej wzór, przedziały ufności (z rozkładu T-Studenta) dla wszystkich uzyskanych z pomiarów napięć  $U_o$  oraz  $U_p$  dla obu biegunowości. Otrzymane przedziały ufności nanieść na wykreślone charakterystyki, wartości obliczonych współczynników tętnień (zgodnie z zależnością 4.4).

**Tabela 4.1.**

Przykładowa tabela pomiarowa (dla jednej geometrii i biegunowości zadanego układu iskiernikowego)

Lp.	a [cm]	$U_{0Atr}$ [V]	$U_{0zas}$ [kV]	$I_{0\mu A}$ [ $\mu A$ ]	$U_{0\mu A}$ [kV]	$W_0$ [-]	$U_{pAtr}$ [V]	$U_{pzas}$ [kV]	$I_{p\mu A}$ [ $\mu A$ ]	$U_{p\mu A}$ [kV]	$W_p$ [-]
1.											
2.											
3.											
1.											
...											

Wyniki pomiarów uzyskane w ćwiczeniu należy przedstawić zgodnie z instrukcją dotyczącą sposobu opracowania wyników, zamieszczoną na końcu niniejszego skryptu. Sprawozdanie winno także zawierać analizę uzyskanych wyników, spostrzeżenia i wnioski wynikające z wykonanych pomiarów, a także ocenę ich zgodności z teoretycznymi oczekiwaniami.

## 5. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Znaczenie wysokiego napięcia stałego w technice probierczej.
2. Układy do wytwarzania wysokiego napięcia stałego z prostowaniem jednopółwkowym.
3. Układy do wytwarzania wysokiego napięcia stałego z prostowaniem dwupółwkowym.
4. Układy powielające do generacji wysokiego napięcia stałego.
5. Kaskadowe generatory wysokiego napięcia stałego.
6. Generator elektrostatyczny Van de Graaffa.
7. Charakterystyka elementów układów prostowniczych.
8. Metody pomiaru wysokiego napięcia stałego.
9. Wpływ biegunowości elektrod na napięcie ulotu w układzie ostrze-płyta.
10. Wpływ biegunowości elektrod na napięcie przeskoku w układzie ostrze-płyta.
11. Charakterystyka napięć ulotu  $U_0$  i przeskoku  $U_p$  w funkcji odległości między elektrodami w układach ostrze-płyta i ostrze-ostrze.

## LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:

1, 3, 4, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 19, 22, 23, 30, 31, 32, 35, 36.

## Ćwiczenie nr 5

# WYTRZYMAŁOŚĆ POWIETRZA PRZY NAPIĘCIU STAŁYM I PRZEMIENNYM W UKŁADZIE Z PRZEGRODAMI

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z wpływem barier izolacyjnych na wytrzymałość elektryczną układu ostrze-płyta z izolacją powietrzną. W szczególności zostanie określony wpływ zmian usytuowania przegrody papierowej względem elektrody ostrzowej, na wytrzymałość układu.

### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

#### 2.1. Układy izolacyjne uwarstwione

Techniczne układy izolacyjne często złożone są z dwóch lub większej liczby dielektryków wypełniających przestrzeń między elektrodami. Ich ułożenie może być bardzo różne i z tego punktu widzenia układ izolacyjny może mieć uwarstwienie szeregowe, równoległe lub ukośne. W przypadku uwarstwienia równoległego, przedstawionego na rys. 5.1, zarówno w dielektryku stałym jak i gazowym wartość i rozkład natężenia pola są identyczne, co można wyrazić wzorem (5.1).

$$E_1 = E_2 \quad (5.1)$$

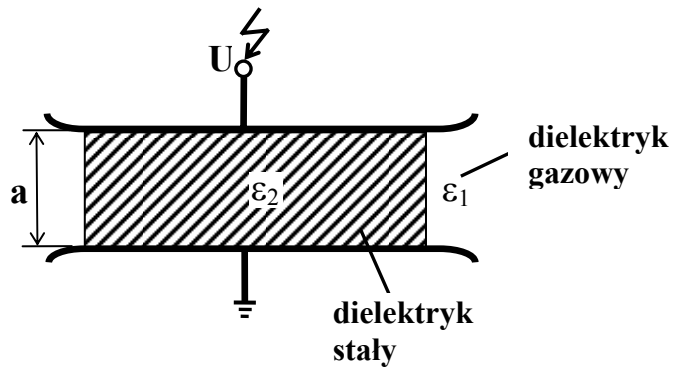
gdzie:

$E_1, E_2$  – natężenia pola elektrycznego odpowiednio w dielektryku gazowym i stałym.

Rodzaj dielektryka stałego współpracującego z gazem nie powinien wpływać, w warunkach idealnych, na wartość napięcia przeskoku. Jednak w warunkach technicznych, na skutek różnych zjawisk taki wpływ istnieje.

Czynniki, które mogą mieć znaczenie, to:

- zniekształcenie pola spowodowane nierównomiernością powierzchni elektrod i zabrudzeniami,
- pojawienie się ładunku przestrzennego,
- zawilgocenie powierzchni dielektryka stałego.



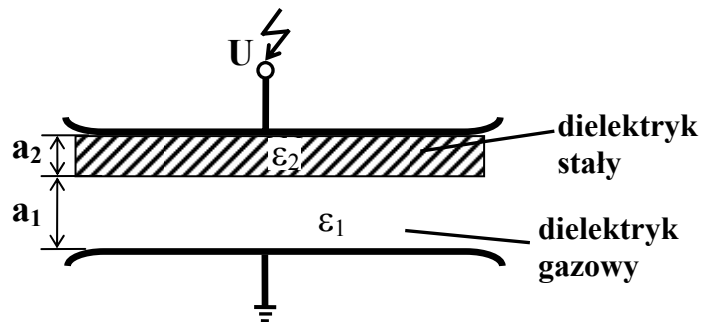
Rys. 5.1. Uwarstwienie równoległe dielektryków stałego i gazowego

W przypadku uwarstwienia szeregowego (rys. 5.2) indukcja elektryczna  $D$  nie zmienia wartości przy przejściu z jednego dielektryka do drugiego. Można to przedstawić w formie równania (5.2).

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 = E_2 \cdot \varepsilon_2 \quad (5.2)$$

gdzie:

$E_1, E_2$  – natężenia pola elektrycznego w dielektryku gazowym i stałym,  
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – przenikalności dielektryka gazowego i stałego.



Rys. 5.2. Uwarstwienie szeregowo dielektryków stałego i gazowego

Dla układu elektrod płaskich można również sformułować zależność:

$$U = E_1 \cdot a_1 + E_2 \cdot a_2 \quad (5.3)$$



Po odpowiednim przekształceniu wzorów 5.2 i 5.3, rozkład natężenia w obu warstwach można przedstawić jako zależność od napięcia oraz grubości i przenikalności graniczących ze sobą dielektryków:

$$E_1 = \frac{U}{a_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot a_2} , \quad (5.4)$$

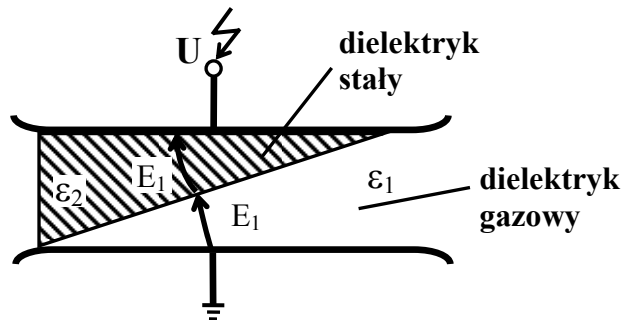
$$E_2 = \frac{U}{a_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot a_1} . \quad (5.5)$$

W układach technicznych wartości obliczone ze wzorów (5.4) i (5.5) można porównać z wytrzymałością zastosowanych dielektryków. Wprowadzenie warstwy dielektryka stałego do układu powietrznego może obniżyć jego wytrzymałość. Również w układzie z dielektrykiem stałym, może dojść do zmniejszenia wytrzymałości w przypadku pojawienia się szczeliny gazowej w pobliżu elektrody lub wtrąciny w samym dielektryku, co może być spowodowane zainicjowaniem wyładowań niezupełnych w gazie.

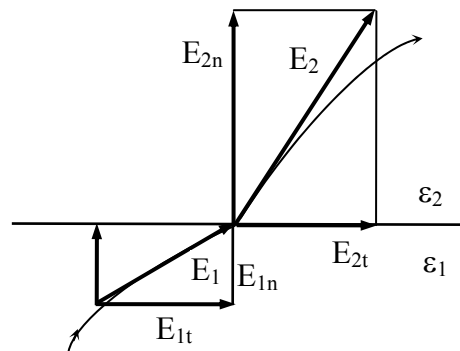
W układzie uwarstwionym ukośnie (rys. 5.3) natężenie pola elektrycznego rozkłada się na składowe styczne ( $E_t$ ) oraz prostopadłe ( $E_n$ ) do granicy dielektryków (rys. 5.4). Zależności między składowymi można zdefiniować następująco:

$$E_{1t} = E_{2t} , \quad (5.6)$$

$$E_{1n} \cdot \epsilon_1 = E_{2n} \cdot \epsilon_2 . \quad (5.7)$$



Rys. 5.3. Uwarstwienie ukośne dielektryków stałego i gazowego



Rys. 5.4. Rozkład pola w uwarstwionych ukośnie dielektrykach

## 2.2. Wpływ barier na wytrzymałość izolacji gazowej

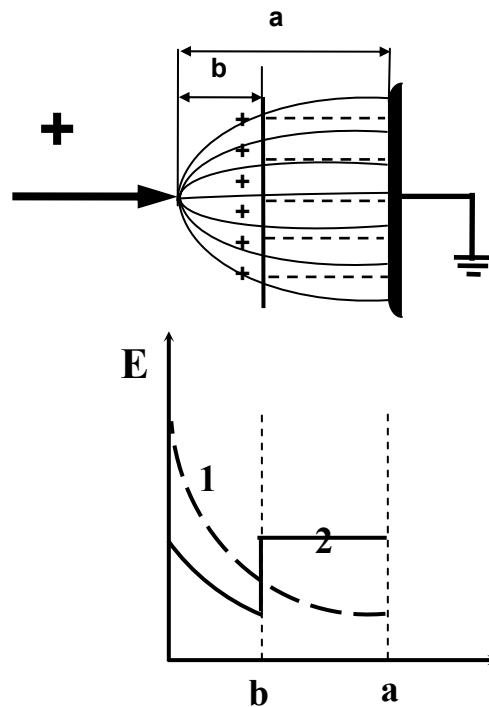
Wytrzymałość izolacji gazowej może być zwiększana poprzez następujące działania:

- zastosowanie wysokiej próżni,
- zastąpienie powietrza o ciśnieniu atmosferycznym sprężonymi gazami (np. azotem lub elektroujemnym sześćfluorkiem siarki),
- wprowadzenie barier izolacyjnych.

Przez barierę (przegrodę) rozumie się cienką warstwę, która zostaje umieszczona w przestrzeni międzyelektrodowej wypełnionej gazem, prostopadle do kierunku pola elektrycznego. Wpływ barier na wytrzymałość układu izolacyjnego jest zależny od rozkładu pola elektrycznego, rodzaju napięcia i umiejscowienia przegrody. Bariery mogą wpływać na rozkład ładunku przestrzennego oraz pola elektrycznego w układzie.

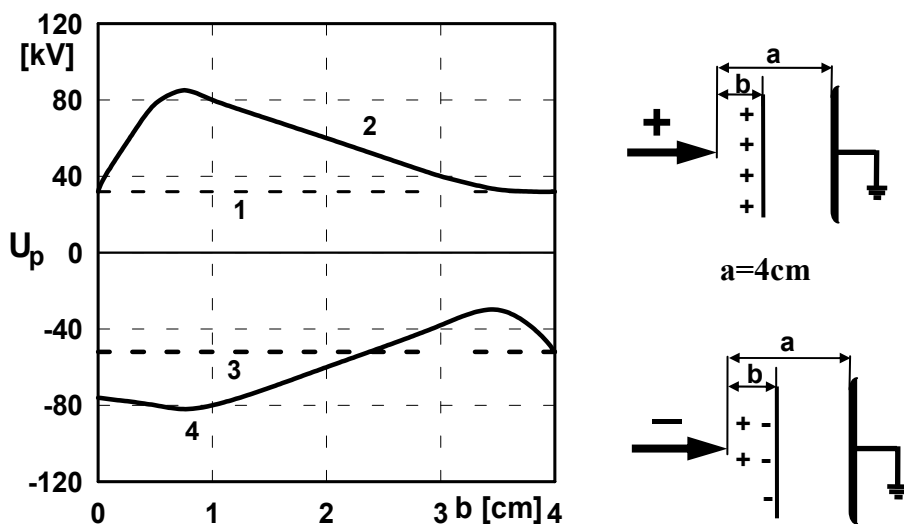
W układzie o polu jednostajnym wpływ barier izolacyjnych jest nieznaczny i może być pominięty. Z kolei w przypadku niejednostajnego rozkładu pola elektrycznego np. w układzie ostrze- płyta istotne jest położenie bariery względem elektrody ostrzowej oraz jej biegunowość. Jeżeli ostrze ma biegunowość dodatnią, elektrony przemieszczają się w jego kierunku. Z kolei jony dodatnie wędrujące do elektrody płaskiej są zatrzymywane przez barierę, tworząc ładunek przestrzenny, którego obecność wpływa na wzmocnienie pola w obszarze bariera- płyta i jego obniżenie między ostrzem i barierą. Rozkład pola staje się bardziej równomierny. Rozmieszczenie i działanie ładunku przestrzennego na rozkład pola elektrycznego przedstawiono na rys. 4.5.

W przypadku, gdy elektroda ostrzowa ma biegunowość ujemną, jony dodatnie przemieszczające się w jej kierunku są zatrzymywane przez barierę.



**Rys. 5.5.** Wpływ bariery izolacyjnej na rozmieszczenie dodatniego ładunku przestrzennego i rozkład pola elektrycznego w układzie ostrze dodatnie – płyta.  
1 - układ bez bariery, 2 - układ z barierą

Położenie przegrody względem elektrody ostrzowej ma znaczący wpływ na wartość napięcia przebicia układu. Porównanie wytrzymałości układów o polu nierównomiernym z przegrodą i bez niej, z różną biegunowością ostrza przedstawiono na rys. 5.6. Z pokazanych na rysunku przebiegów wynika, że najkorzystniejsze jest umieszczenie bariery przy ostrzu w odległości wynoszącej (20-30)% całkowitej odległości między elektrodami. Wytrzymałość układu jest wówczas maksymalna i może zwiększyć się nawet ponaddwukrotnie. Umieszczona w tej najbardziej efektywnej odległości bariera powoduje, że niemal zanika wówczas efekt wpływu biegunowości elektrod na wytrzymałość. Natomiast nie jest korzystne umieszczenie bariery tuż przy elektrodzie płaskiej, ponieważ może wówczas wystąpić efekt obniżenia wytrzymałości w stosunku do układu bez niej.



Rys. 5.6. Wartości napięcia przebicia w zależności od umiejscowienia przegrody dla układów typu ostrze-płyta. Układ bez bariery: 1 - elektroda ostrzowa dodatnia, 3 - elektroda ostrzowa ujemna; układ z barierą: 2 - elektroda ostrzowa dodatnia, 4 - elektroda ostrzowa ujemna

### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

#### 3.1. Zadania do wykonania

W ramach ćwiczenia można przeprowadzić badania (ich zakres określa prowadzący zajęcia) przy napięciu przemiennym lub stałym. Należy wykonać następujące pomiary:

1. Wyznaczyć rzeczywistą przekładnię układu probierczego za pomocą iskiernika kulowego.
2. W układzie ostrze-płyta z izolacją powietrzną bez bariery, zasilanym napięciem przemiennym, określić napięcie początkowe ulotu  $U_0$  i napięcie przeskoku  $U_p$ , dla kilku wartości odległości między elektrodami. Następnie do układu wprowadzić barierę izolacyjną (z papieru izolacyjnego lub folii poliestrowej) i zmieniając jej odległość od elektrody płaskiej określić wpływ jej umiejscowienia na wartości napięć: początkowego ulotu  $U_{0b}$  i przeskoku  $U_{pb}$ .

3. Przeprowadzić skalowanie układu pomiarowego napięcia stałego, wykorzystując opornik  $100\text{ M}\Omega$  i mikroamperomierz. Skalowanie przeprowadzić według wskazówek podanych w ćwiczeniu 4.
4. Przeprowadzić badania analogicznie jak w punkcie 2 dla układu ostrze- płyta zasilanego napięciem stałym, dla obu biegunowości elektrod.

### 3.2. Układy pomiarowe

Ćwiczenie należy wykonać w układzie wysokiego napięcia. W celu wysokonapięciowej, za rezystorem ochronnym, należy podłączyć układ ostrze- płyta. W badanych układach należy zmieniać odległości międzyelektrodowe i odległość między elektrodą ostrzową a barierą, zgodnie z programem pomiarów, przedstawionym w punkcie 3.1. Szczegółowe zmiany odległości między elektrodami w poszczególnych układach określa prowadzący ćwiczenie. Przy zmianach połączeń w obwodzie wysokiego napięcia, w każdym przypadku należy zachować szczególną ostrożność, zwracając uwagę na bezpieczne odległości między elementami, które będą znajdować się pod wysokim napięciem a uziemionymi elementami celki pomiarowej.

### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Protokół pomiarów powinien zawierać wyniki pomiarów napięć początkowych ulotu  $U_0$  i napięć przeskoku  $U_p$  w układzie bez bariery oraz napięć początkowych ulotu  $U_{0b}$  i napięć przeskoku  $U_{pb}$  w układzie z barierą, wyszczególnionych w punkcie 3.1. W szczególności protokół powinien ujmować:

- wyniki wyznaczenia rzeczywistej przekładni układu probierczego lub wyniki skalowania układu napięcia stałego,
- wyniki pomiarów napięcia początkowego ulotu  $U_0$  i napięcia przeskoku  $U_p$  w układzie ostrze - płyta bez bariery,
- wyniki pomiarów napięć początkowych ulotu  $U_{0b}$  i napięć przeskoku  $U_{pb}$  w układzie z barierą izolacyjną, przy różnym usytuowaniu bariery, względem elektrody ostrzowej.

Poza wymienionymi wynikami pomiarów, protokół powinien zawierać następujące informacje ogólne: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących ćwiczenie, datę wykonywania ćwiczenia, ciśnienie i temperaturę powietrza panujące podczas wykonywania ćwiczenia, dane znamionowe przyrządów wykorzystywanych w ćwiczeniu, uwagi i spostrzeżenia przydatne przy opracowywaniu sprawozdania z ćwiczenia. Protokół z wynikami pomiarowymi winien być potwierdzony podpisem przez prowadzącego ćwiczenie.

Przykładowe tabele pomiarowe:

**Tabela 5.1.**

Układ ostrze - płyta bez bariery

Lp.	a [cm]	$U_0$ [V]	$U_{0sr}$ [V]	$U_0$ [kV]	$U_{0n}$ [kV]	$U_p$ [V]	$U_{psr}$ [V]	$U_{pn}$ [kV]
1								
2								
3								

**Tabela 5.2.**

Układ ostrze - płyta z barierą

odległość między elektrodami a= [cm]								
Lp.	b [cm]	$U_0$ [V]	$U_{0sr}$ [V]	$U_0$ [kV]	$U_{0n}$ [kV]	$U_p$ [V]	$U_{psr}$ [V]	$U_{pn}$ [kV]
1								
2								
3								

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonanego ćwiczenia należy opracować sprawozdanie, jedno dla całej sekcji. Sprawozdanie powinno zawierać dane osób wykonujących ćwiczenie i podstawowe dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto w sprawozdaniu należy ująć:

- krótkie wprowadzenie teoretyczne dotyczące ćwiczenia (nie więcej niż jedna strona),
- tabelę z wynikami pomiarów, przeliczonymi na warunki normalne,
- wykresy zależności napięcia początkowego  $U_0$  i napięcia przeskoku  $U_p$  w funkcji odległości międzyelektrodowych dla układów bez bariery.
- wykresy zależności  $U_{0b}/U_0$  i  $U_{pb}/U_p$  w funkcji odległości bariery od elektrody ostrzowej dla układów z barierą.

Sprawozdanie powinno także zawierać analizę uzyskanych wyników, spostrzeżenia i wnioski wynikające z wykonanych pomiarów.

## **5. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE**

1. Charakterystyka układu izolacyjnego uwarstwionego równolegle.
2. Charakterystyka układu izolacyjnego uwarstwionego szeregowo.
3. Charakterystyka układu izolacyjnego uwarstwionego ukośnie.
4. Wpływ ładunku przestrzennego na rozkład pola elektrycznego w układzie elektrod typu ostrze-płyta.
5. Techniczne układy izolacyjne z barierami.
6. Wpływ usytuowania bariery względem elektrody ostrzowej na wytrzymałość układu.

## **LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:**

2, 4, 5, 7, 8, 9, 15, 22, 27, 31.

## Ćwiczenie nr 7

### OCENA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH METODĄ EMISJI AKUSTYCZNEJ

#### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie problematyki związanej z metodami oceny wyładowań niezupełnych występujących w układach izolacyjnych różnych urządzeń elektroenergetycznych. Szczegółowym celem ćwiczenia jest zapoznanie się z możliwościami i ograniczeniami metody emisji akustycznej stosowanej do detekcji i lokalizacji wyładowań niezupełnych występujących w układach izolacji transformatorów dużej mocy.

#### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

##### 2.1. Metody detekcji, pomiaru i lokalizacji wyładowań niezupełnych

Na podstawie zjawisk towarzyszących wyładowaniom niezupełnym zostały opracowane różne metody ich wykrywania (detekcji), pomiaru i lokalizacji. Największe znaczenie mają trzy metody oceny wyładowań:

- a) elektryczne (pomiar ładunku pozornego, pomiar zakłóceń radiofonicznych, pomiar średniego kwadratu ładunków, pomiar mostkowy),
- b) chromatograficzna,
- c) akustyczna.

Podstawowe znaczenie w metrologii wyładowań niezupełnych mają metody elektryczne, szczególnie pomiar ładunku pozornego  $Q_p$ . Mają one bardzo wysoką czułość i mogą być wykorzystywane do detekcji i pomiaru wyładowań o intensywności poniżej 0,1 pC. Są one szeroko stosowane w laboratoriach wysokonapięciowych i na stacjach prób, gdzie istnieją możliwości starannego ekranowania układów pomiarowych i w ten sposób eliminowania zakłóceń. Metody elektryczne na stacjach elektroenergetycznych i w pobliżu linii elektroenergetycznych nie są użyteczne, ze względu na oddziaływanie zakłóceń elektromagnetycznych. Stanowi to ich główną wadę i decyduje o ograniczonym zastosowaniu.



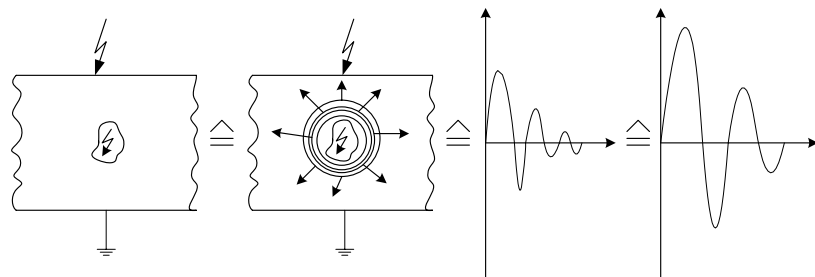
Chromatograficzna metoda oceny izolacji, w tym występujących wyładowań elektrycznych, opiera się na identyfikacji gazów rozpuszczonych w oleju, występujących w wyniku oddziaływania na izolację papierowo-olejową wyładowań lub przegrzań. Metoda ta stosowana do oceny wyładowań niepełnych jest metodą raczej jakościową niż ilościową. Umożliwia detekcję wyładowań i w ograniczonym stopniu ich lokalizację. Metoda może być stosowana do oceny wyładowań niepełnych występujących w urządzeniach elektroenergetycznych z izolacją papierowo-olejową. Metoda chromatograficzna ma aktualnie podstawowe znaczenie w technicznej diagnostyce izolacji transformatorów dużej mocy.

Metoda emisji akustycznej opiera się na wykrywaniu i pomiarze fal ciśnienia emitowanych przez wyładowania niepełne. Bardzo dobrze nadaje się do detekcji i lokalizacji wyładowań w urządzeniach będących w normalnej eksploatacji. Metodą tą można wykrywać wyładowania o intensywności poniżej 100 pC. Metoda może być stosowana do oceny wyładowań niepełnych występujących w transformatorach, przekładnikach wysokiego napięcia, izolatorach przepustowych typu kondensatorowego, kondensatorach energetycznych, rozdzielnicach z SF<sub>6</sub>.

Istnieją także metody oceny wyładowań niepełnych oparte o detekcję światła, ciepła i zmian ciśnienia w kanale wyładowania. Mają one jednak znaczenie tylko teoretyczne i nie znalazły do tej pory technicznego zastosowania.

## **2.2. Fizyczne podstawy metody emisji akustycznej**

Podstawą metody emisji akustycznej jest generacja sygnału akustycznego przez wyładowania niepełne. W czasie wyładowania następuje gwałtowna przemiana części energii elektrycznej na energię mechaniczną. Od strony fizycznej pojedyncze wyładowanie można przyrównać do mikroeksplozji występującej w dielektryku. Wyładowanie niepełne występujące w dielektryku można traktować jako punktowe źródło zaburzeń. Poglądowy schemat generacji impulsu ciśnieniowego przez wyładowanie przedstawiono na rys. 7.1.



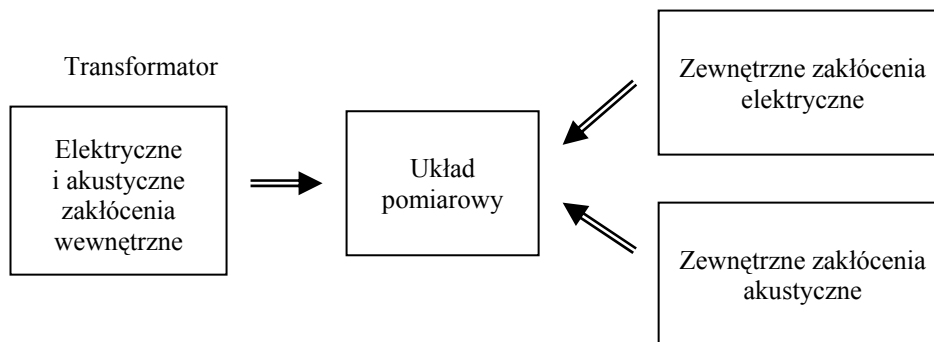
**Rys. 7.1.** Poglądowe przedstawienie sposobu generacji impulsu emisji akustycznej przez wyładowanie

wn

Energia mechaniczna generowana przez wyładowanie rozchodzi się w układzie izolacyjnym i konstrukcyjnym w postaci fal ciśnienia, czyli emisji akustycznej. Pojedynczym wyładowaniom towarzyszy generacja dyskretnej emisji akustycznej, natomiast wieloźródłowym wyładowaniom ciągłym towarzyszy emisja akustyczna ciągła. Emisja akustyczna generowana przez wyładowania rozchodzi się w układzie we wszystkich kierunkach, w postaci fali kulistej.

W drodze od punktu generacji do przetwornika pomiarowego sygnały akustyczne ulegają tłumieniu, odbiciom i załamaniom. Zjawiska te występują na granicy różnych ośrodków fizycznych np. olej-papier, olej-stal, papier-miedź. Widmo częstotliwościowe generowanych sygnałów akustycznych zależy od typu wyładowania i ośrodka, w którym wyładowanie występuje. Na skutek propagacji sygnałów w urządzeniach elektroenergetycznych inne jest widmo sygnałów w punkcie generacji, inne w punkcie ich odbioru, np. na powierzchni kadzi transformatora. Można przyjąć, że w punkcie odbioru, widmo sygnałów akustycznych generowanych przez różne typy wyładowań mieści się w granicach od kilku kHz do około 500 kHz. W większości przypadków maksimum energii sygnałów występuje w przedziale częstotliwości od kilkunastu kHz do 100 kHz. W niektórych przypadkach na podstawie analizy widma częstotliwościowego emitowanych sygnałów emisji akustycznej, można identyfikować rodzaj wyładowań niepełnych. Widmo amplitudowe odbieranych sygnałów w decydującym stopniu zależy od stosowanego układu pomiarowego i przyjętych parametrów metrologicznych, a zwłaszcza progu dyskryminacji sygnałów.

Emisja akustyczna generowana przez wyładowania niepełne jest zakłócana sygnałami pochodzącymi z różnych źródeł. Możliwe rodzaje zakłóceń towarzyszących pomiarom wyładowań metodą emisji akustycznej przedstawiono na rys. 7.2.



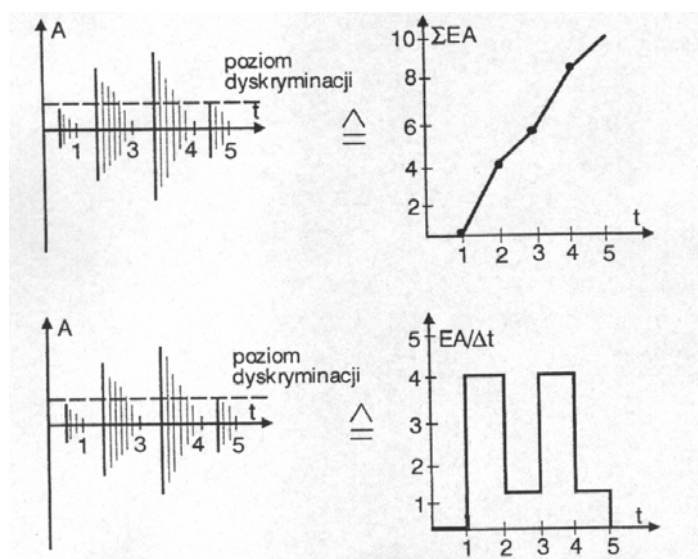
**Rys. 7.2.** Schematyczne przedstawienie zakłóceń towarzyszących pomiarom wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej

Parametry sygnałów zakłócających zależą od rodzaju urządzenia, w którym wykonuje się pomiary wyładowań. W transformatorach źródłem wewnętrznych zakłóceń są drgania magnetostrykcyjne rdzenia i drgania dynamiczne uzwojeń. Zewnętrzne zakłócenia akustyczne zależą od otoczenia, w którym urządzenie pracuje. Podstawowym zakłóceniem jest hałas, a w transformatorach także drgania wywołane pracą wentylatorów chłodzących i pomp tłoczących olej. Zakłócenia akustyczne od zewnętrznych wyładowań ulotowych nie są istotne, gdyż ze względu na różnice impedancji akustycznych powietrza, materiałów izolacyjnych i konstrukcyjnych urządzeń elektroenergetycznych są prawie całkowicie wytłumione. Jednak zewnętrzne wyładowania ulotowe stanowią zakłócenia typu elektromagnetycznego, które muszą być eliminowane przez bardzo staranne ekranowanie i uziemienie układu pomiarowego. Zakłócenia tego typu mogą także pochodzić od spawarek i nadajników radiowych. Celem eliminacji większości z wymienionych zakłóceń, pomiary emisji akustycznej generowanej przez wyładowania wykonuje się najczęściej w paśmie od około 20 kHz do około 100 kHz.

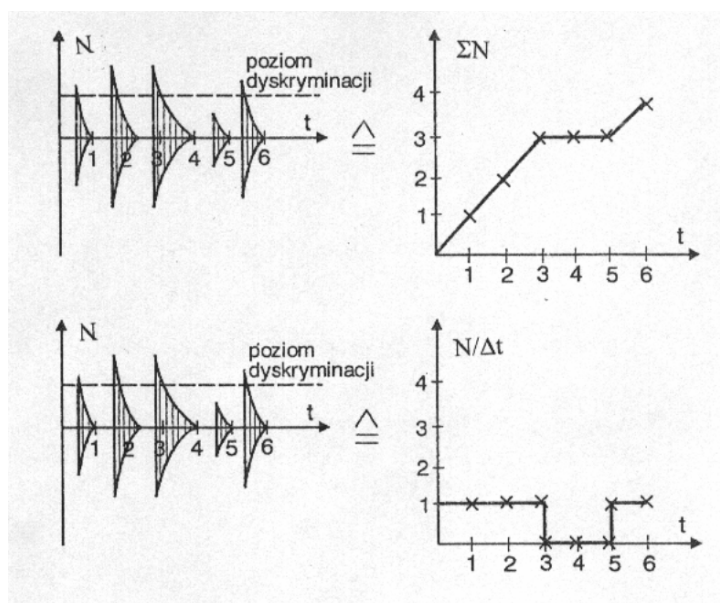
Ważnym zagadnieniem w pomiarach emisji akustycznej generowanej przez wyładowania jest dobór deskryptora, który najlepiej charakteryzuje szkodliwość wyładowań. Najczęściej stosowanym deskryptorem jest maksymalna amplituda sygnału elektrycznego przetworzonego w przetworniku odbiorczym z sygnału akustycznego, pochodzącego od wyładowań niepełnych. Amplituda ta jest z reguły wyrażana w miliwoltach. Bardziej zaawansowanymi deskryptorami sygnałów emisji akustycznej są tempo i suma emisji akustycznej oraz tempo i suma zdarzeń akustycznych. Fizyczny sens tych deskryptorów wyjaśniają rys. 7.3 i 7.4.

Sumę emisji akustycznej ( $\Sigma EA$ ) uzyskuje się przez zliczanie w przyjętym przedziale czasu kolejnych amplitud sygnału, przekraczających przyjęty poziom dyskryminacji. Tempo emisji akustycznej ( $EA/\Delta t$ ) uzyskuje się przez zliczanie amplitud emisji akustycznej przekraczających przyjęty poziom dyskryminacji w jednostce czasu (np. w jednej sekundzie). Sumę i tempo zdarzeń akustycznych definiuje się podobnie, z tą różnicą, że zamiast pojedynczych amplitud zlicza się obwiednie sygnałów (rys. 7.4).

Aktualnie zasadnicze znaczenie dla doboru deskryptora najlepiej charakteryzującego szkodliwość wyładowań elektrycznych mają procedury numeryczne, oparte o metody statyczne.



**Rys. 7.3.** Poglądowe przedstawienie sposobu określania sumy i tempa emisji akustycznej, A – liczba impulsów EA

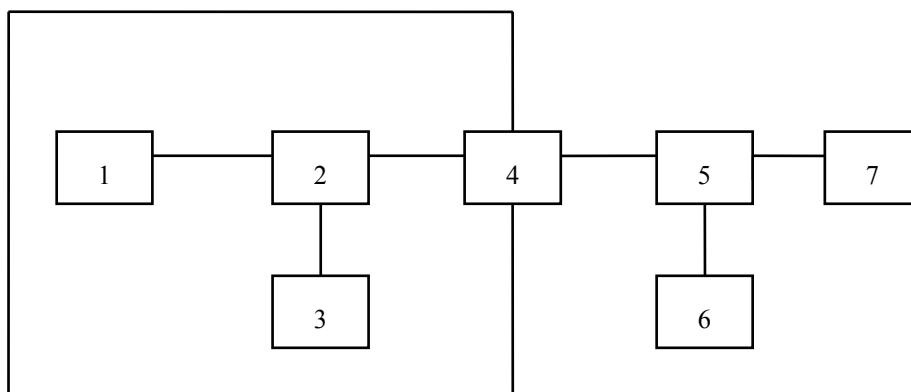


Rys. 7.4. Poglądowe przedstawienie sposobu określania sumy i tempa zdarzeń akustycznych,  $N$  – liczba zdarzeń EA

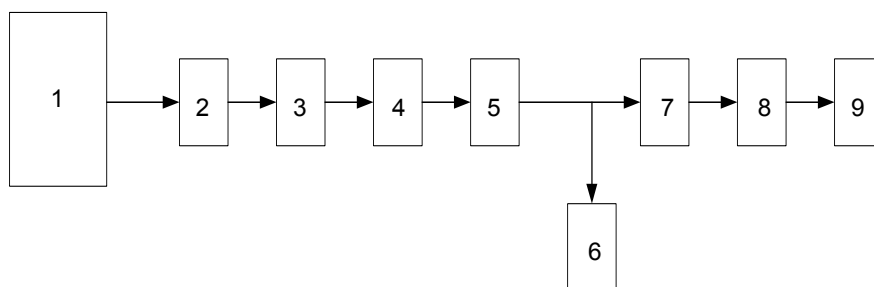
## 2.4. Układy pomiarowe

Z punktu widzenia metrologii proces generacji i pomiaru wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej można przedstawić w postaci schematu blokowego, pokazanego na rys. 7.5.

W przedstawionym układzie źródłem informacji o wyładowaniach są sygnały akustyczne (1). Można je rozpatrywać jako impulsowe zaburzenia sprężyste, rozchodzące się w kanale akustycznym (2). Do przetwornika pomiarowego (4) dochodzą sygnały akustyczne od wyładowań, z nałożonymi zakłóceniami wewnętrznymi (3). Przetwornik piezoelektryczny (4) transformuje sygnały akustyczne na sygnały napięciowe i przesyła je do toru pomiarowego (5). Na aparaturę pomiarową (5), oddziałują zakłócenia zewnętrzne (6). Przetworzony w aparaturze pomiarowej sygnał jest kierowany do komputera (7).



**Rys. 7.5.** Ogólny schemat zjawiska generacji i pomiaru wylądowań metodą emisji akustycznej. 1 – wylądowanie; punkt generacji sygnałów, 2 – kanał propagacji sygnałów, 3 – zakłócenia wewnętrzne, 4 – przetwornik piezoelektryczny, 5 – tor pomiarowy, 6 – zakłócenia zewnętrzne, 7 – komputer



**Rys. 7.6.** Schemat układu do detekcji, pomiaru i lokalizacji emisji akustycznej od wylądowań niezupełnych. 1 – badane urządzenie, 2 – przetwornik, 3 – przedwzmacniacz, 4 – wzmacniacz, 5 – filtr środkowo-przepustowy, 6 – oscyloskop, 7 – dyskryminator progowy, 8 – przelicznik impulsów, 9 – komputer

Procesowi generacji emisji akustycznej przedstawionemu na rys. 7.7, można przyporządkować ogólny układ pomiarowy. Jego schemat przedstawiono na rys. 7.6.

Do odbioru emisji akustycznej generowanej przez wylądowania najodpowiedniejsze są przetworniki piezoelektryczne. Można wyodrębnić trzy podstawowe konstrukcje przetworników piezoelektrycznych:

- hydrofony, przeznaczone do pomiarów ciśnienia w ośrodku ciekłym (np. w oleju),
- przetworniki stykowe mikrofonowe, przeznaczone do pomiarów ciśnienia w ośrodkach stałych,
- przetworniki stykowe rezonansowe (akcelerometry), przeznaczone do pomiarów przyspieszenia.

W ogólnym układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 7.6, można wyodrębnić część uproszczoną, składającą się z elementów od (1) do (6). Taki uproszczony układ może służyć do wizualizacji sygnałów akustycznych od wyładowań. Dołączenie do układu elementów (7), (8) i (9) umożliwia pomiar intensywności wyładowań i ich lokalizację. Istnieją różne techniczne realizacje ogólnego układu pomiarowego. Konkretny wybór układu pomiarowego zależy od rodzaju badanego urządzenia, warunków metrologicznych i zakresu diagnostyki. Aktualnie układy pomiarowe są standardowo wyposażone w kable i łącza światłowodowe umożliwiające bezzakłóceniewe rozprowadzenie sygnałów pomiarowych.

## 2.5. Techniczne znaczenie metody emisji akustycznej

Akustyczna metoda oceny wyładowań niezupełnych umożliwia ich detekcję, pomiar i lokalizację. Metoda może być stosowana zarówno w warunkach laboratoryjnych jak również w odniesieniu do urządzeń będących w normalnej eksploatacji. W szczególności metoda może być użyteczna w diagnostyce wyładowań występujących w izolacji następujących urządzeń:

- transformatorów dużej mocy w normalnej eksploatacji,
- transformatorów poddanych próbom napięciowym,
- napięciowych i prądowych przekładników wysokiego napięcia,
- przepustów transformatorowych zainstalowanych w transformatorach,
- przepustów transformatorowych poddanych próbom napięciowym,
- kondensatorów energetycznych,
- rozdzielnic z SF<sub>6</sub>.

Metoda emisji akustycznej stanowi ważne uzupełnienie metod pomiarowych stosowanych do tej pory. Podaje informacje nieosiągalne innymi metodami o istnieniu, intensywności i przede wszystkim o miejscu występowania wyładowań niezupełnych. W większości przypadków umożliwia jednoznaczne rozstrzygnięcie, bezpośrednio przy mierzonym transformatorze, czy występują wyładowania, lub przyczynę degradacji izolacji powoduje inne zjawisko. Zakres stosowania metody może być ograniczony następującymi czynnikami:

- wysokim poziomem zakłóceń akustycznych lub elektromagnetycznych,
- złożoną geometrią mierzonych obiektów, uniemożliwiająca zamocowanie do ich powierzchni przetworników pomiarowych,
- stosowaniem w konstrukcjach badanych urządzeń dielektryków lub układów izolacyjnych o niskim współczynniku sprężystości.

Metoda emisji akustycznej nie zastępuje metod stosowanych do tej pory, a jedynie podaje nowy wskaźnik charakteryzujący wyładowania. Wskaźnik ten należy traktować na równi z ładunkiem pozornym  $Q_p$  wyładowań, lub systemem kodów stosowanych dla interpretacji wyników z analizy chromatograficznej. Przy interpretacji wyników uzyskiwanych metodą emisji akustycznej zawsze należy brać pod uwagę jej ograniczenia wynikające z mechanizmu generacji i propagacji sygnałów akustycznych w materiałach izolacyjnych i konstrukcyjnych badanych urządzeń. Najważniejszą zaletą metody akustycznej polega na możliwości jej stosowania w bardzo trudnych warunkach eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, w których ocena wyładowań była do tej pory niemożliwa. W stosunku do elektrycznej metody pomiarów wyładowań niezupełnych i chromatograficznej ich oceny, metoda emisji akustycznej posiada następujące zalety:

- umożliwia detekcję, pomiar i lokalizację wyładowań, bezpośrednio przy transformatorze, podczas jego normalnej eksploatacji,
- jest stosunkowo mało wrażliwa na zakłócenia,
- aparatura pomiarowa jest stosunkowo prosta i dostępna na rynku krajowym.

### **3. PROGRAM ĆWICZENIA**

#### **3.1. Zadania do wykonania**

W ćwiczeniu przewidziane są następujące zadania do wykonania:

1. Przygotować układ do generacji wyładowań typu ślizgowego w oleju i umieścić go w kadzi transformatora.
2. Dobrać i połączyć układ do detekcji, pomiaru i lokalizacji wyładowań metodą emisji akustycznej.
3. Dla dwóch wartości napięcia generacji wyładowań w oleju, równych  $0,7 U_p$  i  $0,8 U_p$  zarejestrować sumę i tempo emisji akustycznej oraz sumę i tempo zdarzeń akustycznych. Czas rejestracji  $t = 60$  s.
4. Określić wpływ przegrody izolacyjnej na rejestrowaną emisję akustyczną od wyładowań. Zakres i parametry pomiarów jak w układzie bez przegrody.



### 3.2. Układy pomiarowe i sposób wykonania pomiarów

Układ do generacji wyładowań niezupełnych typu ślizgowego należy zestawić w standardowej celce wysokonapięciowej. Do generacji wyładowań ślizgowych należy wykorzystać iskiernik walec - płaszczyzna z przegrodą szklaną. Iskiernik ten należy umieścić w otwartej kadzi transformatora wypełnionej olejem izolacyjnym. Układ należy zasilić z pulpitu wysokonapięciowego, stanowiącego integralną część celki, opisanego w ćwiczeniu 1.

Do rejestracji emisji akustycznej należy wykorzystać panele układu Standard lub Dema, będące na wyposażeniu laboratorium. Podstawowy układ pomiarowy winien obejmować przetwornik hydrofonowy lub stykowy, wzmacniacz, dyskryminator progowy, przelicznik impulsów, rejestrację komputerową.

W celu zarejestrowania wskazanych przez prowadzącego ćwiczenie deskryptorów emisji akustycznej należy najpierw przygotować układ do generacji wyładowań ślizgowych w oleju i układ do rejestracji sygnałów akustycznych. Następnie z pulpitu sterowniczego zasilić iskiernik zanurzony w oleju i zwiększać napięcie aż do przeskoku, określając napięcie zapłonu  $U_z$  wyładowań i napięcie przeskoku  $U_p$ . Układ powtórnie zasilić napięciem równym  $0,7 U_p$ . Załączyć układ pomiarowy i rejestrować kolejno tempo i sumę emisji oraz tempo i sumę zdarzeń akustycznych. Czas rejestracji przyjąć 60 s. Wzmocnienie i próg dyskryminacji dobrać odpowiednio do istniejących w laboratorium warunków metrologicznych. Następnie między przetwornikiem pomiarowym i iskiernikiem należy wprowadzić przegrodę z preszpanu ( $d = 2 \text{ mm}$ ) i całą procedurę pomiarową powtórzyć. Celem sprawdzenia możliwości lokalizacji obszaru wyładowań przez pomiar czasu dojścia sygnału akustycznego do przetwornika, należy dla dwóch skrajnych położenia iskiernika generującego wyładowanie zmierzyć czasy dojścia do przetwornika. Pomiar wykonać przy napięciu  $U = 0,8 U_p$ . W obliczeniach przyjąć następujące prędkości propagacji fal akustycznych w oleju  $v = 1410 \text{ m/s}$  i w stali  $v = 5400 \text{ m/s}$ . Pomiar prowadzić dla dwóch położenia iskiernika generującego wyładowania.

### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Protokół winien zawierać standardowe dane dotyczące ćwiczenia: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących, datę wykonywania ćwiczenia, ciśnienie i temperaturę powietrza, dane znamionowe przyrządów wykorzystanych w ćwiczeniu, uwagi i spostrzeżenia przydatne przy opracowaniu sprawozdania. Ponadto protokół winien zawierać:

- szkic układu do generacji wyładowań ślizgowych,
- schemat i parametry metrologiczne układu pomiarowego,
- wyniki rejestracji  $\Sigma EA$ ,  $EA/\Delta t$ ,  $\Sigma N$ ,  $N/\Delta t$  w układzie bez przegrody,
- wyniki rejestracji  $\Sigma EA$ ,  $EA/\Delta t$ ,  $\Sigma N$ ,  $N/\Delta t$  w układzie z przegrodą przespanową,
- szkic usytuowania iskiernika w kadzi i wyniki pomiarów czasów opóźnień dla przetwornika pomiarowego umieszczonego w różnych punktach kadzi. Protokół z wynikami pomiarowymi winien być potwierdzony podpisem przez prowadzącego ćwiczenie.

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonanego ćwiczenia należy przygotować sprawozdanie, jedno dla całej sekcji realizującej ćwiczenie. Sprawozdanie winno zawierać standardowe dane osób wykonujących ćwiczenie oraz podstawowe dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto sprawozdanie winno obejmować:

- bardzo krótką teorię dotyczącą ćwiczenia – nie więcej niż jedną stronę, obliczenia i wykresy średniego tempa emisji akustycznej w czasie i w funkcji napięcia generacji wyładowań,
- obliczenia i wykresy średniego tempa zdarzeń akustycznych w czasie i w funkcji napięcia generacji wyładowań,
- obliczenia wartości sumy emisji akustycznej i sumy zdarzeń akustycznych zarejestrowanych po 60 s,
- obliczenia czasów opóźnień, z jakimi sygnały emisji akustycznej winny docierać do przetwornika umieszczonego w różnych punktach i porównanie ich z wartościami zmierzonymi.

Sprawozdanie winno zawierać analizę uzyskanych wyników i wnioski płynące z pomiarów. Ta część sprawozdania winna obejmować: porównanie wartości emisji akustycznej generowanej przez wyładowania, porównanie wartości emisji akustycznej generowanej przez wyładowania w układzie bez przegrody i z przegrodą. Winna zawierać również określenie relacji między tempem emisji i zdarzeń, sumą emisji i zdarzeń w zależności od napięcia generacji wyładowań oraz określenie dokładności lokalizacji wyładowań przez pomiar czasów dojścia sygnałów do przetwornika umieszczonego w różnych punktach.

## **5. PYTANIA KONTROLNE**

1. Najważniejsze metody oceny wyładowań niezupełnych i ogólna ich charakterystyka.
2. Elektryczne metody pomiaru wyładowań niezupełnych.
3. Chromatograficzna metoda oceny wyładowań niezupełnych.
4. Fizyczne podstawy zjawiska wyładowań, na których opiera się metoda emisji akustycznej.
5. Rodzaje zakłóceń towarzyszące pomiarom wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej i sposoby ich eliminacji.
6. Deskryptory emisji akustycznej charakteryzujące zjawisko wyładowań niezupełnych.
7. Układy pomiarowe stosowane do detekcji, pomiaru i lokalizacji wyładowań metodą emisji akustycznej.
8. Rodzaje i konstrukcje przetworników pomiarowych przeznaczonych do odbioru emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne.
9. Zjawisko piezoelektryczne.
10. Techniczny zakres stosowania metody emisji akustycznej.
11. Zalety i ograniczenia metody emisji akustycznej.
12. Porównanie metody emisji akustycznej z metodą elektryczną i chromatograficzną.

### **LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:**

5, 10, 15, 25, 26, 27, 29.

# Ćwiczenie nr 10

## BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI UDAROWEJ POWIETRZA

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie sposobu wyznaczania charakterystyk udarowych powietrznych układów izolacyjnych i ich znaczenia dla koordynacji izolacji.

### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

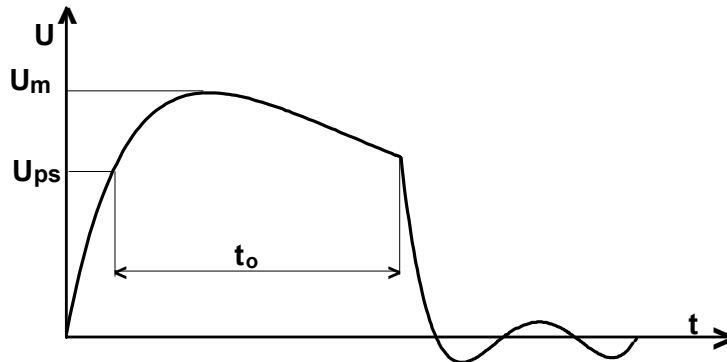
#### 2.1. Przebieg powietrza przy napięciu udarowym

Pod pojęciem wytrzymałości statycznej rozumie się wytrzymałość elektryczną, gdy napięcie między elektrodami układu izolacyjnego można uznać za praktycznie niezmiennie w czasie trwania wyładowania elektrycznego [8]. Wytrzymałość powietrza przy napięciu udarowym jest często większa niż wytrzymałość statyczna. Jest to spowodowane opóźnieniem rozwoju wyładowania. Jeżeli czas trwania napięcia przekraczającego wartość  $U_{ps}$  odpowiadającej wytrzymałości statycznej będzie krótszy od czasu potrzebnego do wywołania wyładowania, to wyładowanie nie wystąpi. Na czas opóźnienia  $t_0$  składają się dwa elementy: statystyczny czas opóźnienia wyładowania  $t_s$  i czas formowania się wyładowania  $t_f$ :

$$t_0 = t_s + t_f \quad (10.1)$$

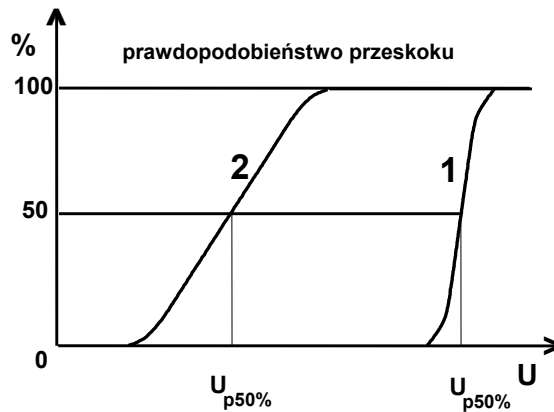
Opóźnienia statystyczne (rys. 10.1) jest liczone do chwili pojawienia się w przestrzeni międzyelektrodowej pierwszego wolnego elektronu zdolnego do zapoczątkowania wyładowania. Zależy ono od odstępów między elektrodami, nadwyżki napięcia ( $U_m - U_{ps}$ ), od napromieniowania uwalniającego pierwotne elektrony i od niejednorodności pola. Czas formowania się wyładowania liczony jest od momentu pojawienia się pierwszego jonizującego elektronu do przeskoku i wiąże się z mechanizmem rozwoju wyładowania. Składnik ten związany jest z ograniczonymi prędkościami lawiny elektronowej i kanału plazmowego. Jego wartość rośnie ze wzrostem odstępów między elektrodami oraz niejednorodności

poła, a maleje bardzo szybko przy wzroście napięcia udarowego. Zapłon iskry udarowej powoduje tzw. ucięcie udaru, tzn. strome obniżenie napięcia udarowego do niewielkiej części napięcia przeskoku.



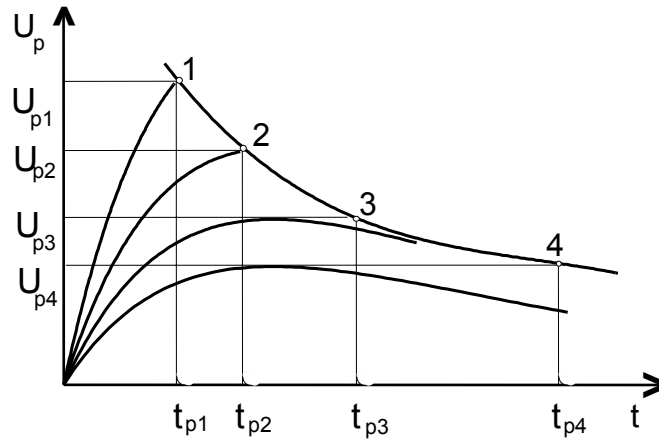
Rys. 10.1. Przebieg napięcia udarowego, z uciętym grzbietem

Przypadkowość opóźnienia przeskoku powoduje, że wartość napięcia przeskoku nie jest jednoznaczna. Dlatego przy próbach napięciem udarowym określa się pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku  $U_{p50\%}$ . Napięcie przeskoku pięćdziesięcioprocentowe, to takie, przy którym połowa przyłożonych do badanego układu izolacyjnego udarów powoduje w nim przeskok. Często, dla układów z izolacją regenerującą się, określa się również umowne napięcie wytrzymywane, zazwyczaj równe 10-procentowemu napięciu przeskoku. Zależność prawdopodobieństwa przeskoku od wartości szczytowej udarów można przedstawić graficznie (rys. 10.2).



Rys. 10.2. Zależność prawdopodobieństwa przeskoku od wartości szczytowej udarów: 1 – układ o polu jednostajnym, 2 – układ o polu niejednostajnym

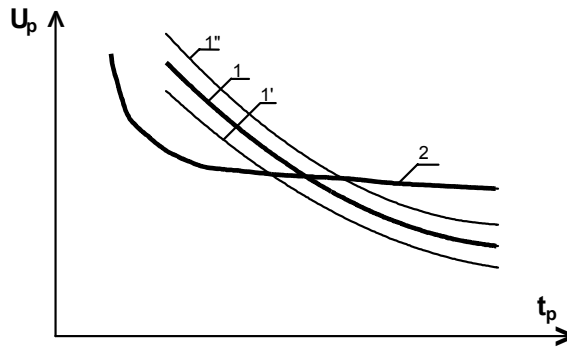
Przy napięciu udarowym wytrzymałości układu izolacyjnego nie da się określić jedną wartością napięcia. Do tego celu wykorzystuje się charakterystykę udarową. Charakterystyka udarowa jest zależnością napięcia przeskoku  $U_p$  od czasu do przeskoku  $t_p$ . Zasadę konstrukcji charakterystyki udarowej przedstawiono na rys. 10.3.



Rys. 10.3. Sposób konstrukcji charakterystyki udarowej

Do układu doprowadzone zostają udary o takim samym kształcie, ale o różnej wartości szczytowej (wystarczającej do wywołania przeskoku). Jeżeli przeskoczek nastąpi na grzbiecie, to za wartość napięcia wywołującą przeskoczek przyjmuje się wartość szczytową udaru. Skojarzone ze sobą pary wartości  $U_{pi} - t_{pi}$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) pozwalają na wykreślenie charakterystyki udarowej przedstawionej na rys. 10.3. Jeżeli dla udarów o danej wartości szczytowej zostanie przeprowadzona większa liczba pomiarów, to z przyczyn opisanych w punkcie 2.1, skojarzone ze sobą wartości  $U_{pi} - t_{pi}$ , będą wyznaczać punkty rozproszone. Uzyskuje się w ten sposób nie jedną charakterystykę, ale pas dyspersyjny zawarty między dwiema krzywymi (1' i 1'' na rys. 10.4). Krzywe te odpowiadają zbliżonym do granicznych, 0-procentowym i 100-procentowym, wartościom prawdopodobieństwa przeskoku. Krzywa 1 odpowiada wartościom przeciętnym. Szerokość pasa i nachylenie zależy od niejednorodności pola. Dla układów o polu jednorodnym charakterystyka jest bardziej płaska, a pas zawęża się. Znajomość charakterystyk udarowych dla różnych układów izolacyjnych pozwala na odpowiedni dobór urządzeń współpracujących ze sobą. Izolacja urządzeń o jednakowym napięciu znamionowym nie jest jednakowo wytrzymała. Prawidłowe uszeregowanie poziomów wytrzymałości elektrycznej należy do zadań koordynacji izolacji. Jej celem jest zagwarantowanie wymaganego stopnia pewności pracy układu. Dopuszczenie ewentualnych

wyładowań powinno być ograniczone do miejsc, w których nie spowodują zagrożenia porażeniowego obsługi i uszkodzeń urządzeń.



**Rys. 10.4.** Charakterystyki udarowe: 1 - układ o polu niejednostajnym, 2 - układ o polu jednostajnym

Do określenia wytrzymałości udarowej izolacji stosuje się często współczynnik udarowy  $k_u$ . Jest on definiowany jako stosunek wytrzymałości udarowej do wytrzymałości statycznej przy napięciu przemiennym:

$$k_u = \frac{U_{p50\%}}{U_{ps}} \quad (10.2)$$

gdzie:

$U_{p50\%}$  – pięćdziesięcioprocentowe udarowe napięcie przeskoku, kV;

$U_{ps}$  – średnia wartość szczytowa przemiennego napięcia przeskoku, kV.

Współczynnik udarowy zależy od jednostajności pola. Dla układów o polu jednostajnym jest bliski jedności, natomiast dla układów o polu silnie niejednostajnym może zawierać się w granicach (1,1 – 1,5).

### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

#### 3.1. Zadania do wykonania

1. Przeprowadzić skalowanie układu pomiarowego za pomocą iskiernika kulowego i woltomierza elektrostatycznego (lub mikroamperomierza i opornika pomiarowego).
2. Wyznaczyć prawdopodobieństwo przeskoku iskiernika ostrzowego ( $a = 4$  cm) i płaskiego ( $a = 2$  cm) w funkcji wartości szczytowej napięcia udarowego.

3. Wyznaczyć charakterystyki udarowe iskierników z punktu 2.
4. Wyznaczyć charakterystykę udarową iskiernika kulowego ( $a = 2,5$  cm,  $\phi = 12,5$  cm).
5. Wyznaczyć współczynniki udarowe dla badanych iskierników.
6. Określić odstęp elektrod iskiernika chroniącego zapewniającego właściwy poziom ochrony chronionego obiektu.

### 3.2. Układy pomiarowe i sposób przeprowadzania pomiarów

Pomiary należy wykonać w układzie pomiarowym, przedstawionym w instrukcji do poprzedniego ćwiczenia na rys. 9.5.

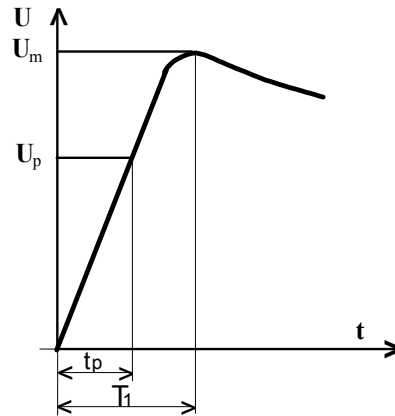
Skalowanie układu pomiarowego polega na określeniu zależności między wartością szczytową udarów a wskazaniem woltomierza elektrostatycznego (lub wskazań mikroamperomierza z szeregowym opornikiem) mierzącego napięcie ładowania kondensatorów. Skalowanie należy przeprowadzić dla odstępów między elektrodami iskiernika pomiarowego wynoszących: (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5) cm. Dla każdej odległości między elektrodami należy znaleźć wartość szczytową udarów, przy której liczba przeskoków na iskierniku pomiarowym wyniesie 50% liczby doprowadzonych udarów. Wartość  $U_{p50\%}$  można wyznaczyć przez interpolację liniową z dwóch wartości napięcia, z których jedna odpowiada (1-2) przeskokom na 10 kolejnych udarów, druga (8-9) przeskokom na 10 udarów.

W celu wyznaczenia zależności prawdopodobieństwa przeskoku od wartości szczytowej napięcia udarowego, należy przeprowadzić pomiary metodą serii opisaną w ćwiczeniu 11 (punkt 2.4 i 3).

Aby wyznaczyć charakterystyki udarowe, należy wykonać 5-6 oscylogramów dla czterech udarów napięciowych o różnych wartościach szczytowych napięcia. Dla każdego przebiegu określić  $U_m$ ,  $U_p$ ,  $t_p$ .

Wartości te można również (w przypadku gdy nie ma możliwości wykorzystania oscylografu) wyznaczyć w sposób przybliżony. Na podstawie wzorów z ćwiczenia nr 11 należy określić czas trwania czoła  $T_1$ , czas do półszczytu  $T_2$ , a następnie zmierzyć pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku. Przy założeniu, że przeskok następuje w tym przypadku po czasie  $t_p = T_1$ , otrzymuje się pierwszy punkt charakterystyki. Przy dalszych pomiarach należy zwiększyć wartość szczytową udaru i zmierzyć napięcie przeskoku  $U_p$ , a po odłączeniu badanego obiektu zmierzyć również wartość szczytową napięcia  $U_m$ . Do pomiarów wykorzystać miernik wartości szczytowej. Znajac wartości  $U_m$ ,  $U_p$ ,  $T_1$ , czas  $t_p$  do przeskoku można wyznaczyć graficznie (rys. 10.5).





Rys. 10.5. Sposób wyznaczania wartości czasu  $t_p$

Aby wyznaczyć współczynnik udarowy należy obliczyć pięćdziesięcioprocentowe udarowe napięcie przeskoku (na podstawie wyników otrzymanych w punkcie 2), a następnie zmierzyć statyczne napięcie przeskoku danego iskiernika. Do pomiarów statycznego napięcia przeskoku należy wykorzystać transformator probierczy zasilający generator udarowy.

W celu określenia odstępów elektrod iskiernika zapewniającego właściwą ochronę obiektu, należy zmieniać odległość między elektrodami w taki sposób, aby przeskoki bez względu na wartość szczytową udarów, występowały jedynie między jego elektrodami. Sprawdzenia należy dokonać dla kilku wartości szczytowych. Dla każdego poziomu napięcia doprowadzić serię dziesięciu udarów i obserwować, czy przeskoki występują tylko na iskierniku chroniącym. Jeżeli nastąpi przeskok na obiekcie chronionym, należy zmniejszyć odległość między elektrodami iskiernika i kontynuować powyższe próby.

### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Protokół powinien zawierać:

- wyniki skalowania układu: odstęp iskiernika  $a$ , napięcia  $U_p$ ,  $U_0$ ,
- wyniki pomiarów liczby przeskoków na serię 20 udarów dla różnej wartości maksymalnej i różnej biegunowości udarów (dla poszczególnych iskierników),
- wyniki pomiarów  $U_m$ ,  $U_p$ ,  $t_p$  i biegunowości udarów dla różnych iskierników,
- wyniki pomiarów  $U_{ps}$  dla poszczególnych iskierników,
- wyniki pomiaru odległości elektrod zapewniającej właściwą ochronę obiektu.

Poza wymienionymi wynikami pomiarów protokół powinien zawierać następujące dane ogólne: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących, datę wykonywania ćwiczenia, ciśnienie i temperaturę powietrza, dane znamionowe przyrządów wykorzystywanych w ćwiczeniu, uwagi i spostrzeżenia przydatne przy opracowywaniu sprawozdania. Protokół z wynikami pomiarowymi powinien być potwierdzony podpisem przez prowadzącego ćwiczenie.

Przykładowe tabele pomiarowe:

**Tabela 10.1.**

Skalowanie układu pomiarowego

Lp.	a	$U_0$	$U_{pn}$	$U_{p\delta}$
	mm	kV	kV	kV
1				
2				
3				

**Tabela 10.2.**

Pomiary napięcia przeskoku iskiernika

i	$n_i$	$d_i$	$p_i$	$U_{mi}$
-	-	-	-	kV
1				
2				
3				

**Tabela 10.3.**

Wyznaczenie charakterystyki udarowej

Lp.	a	$U_m$	$U_p$	$t_p$
	mm	kV	kV	$\mu s$
1				
2				
3				

**Tabela 10.4.**

Wyznaczenie współczynnika udarowego

Lp.	a	$U_{p50\%}$	$U_{ps}$
	mm	kV	kV
1			
2			
3			

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonanego ćwiczenia należy przygotować sprawozdanie jedno dla całej sekcji realizującej ćwiczenie. Sprawozdanie powinno zawierać dane osób wykonujących ćwiczenie standardowe oraz dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto sprawozdanie winno obejmować:

- krótki wstęp teoretyczny dotyczący ćwiczenia - nie więcej niż jedna strona,
- wykres zależności wartości szczytowej napięcia udarowego od napięcia ładowania  $U_0$ , wykonany na podstawie wyników skalowania układu pomiarowego,
- wykres zależności prawdopodobieństwa przeskoku od wartości szczytowej udarów dla badanych iskierników (ostrzowego i płaskiego), obliczenia prostej regresji,  $U_{p50\%}$  i odchylenia standardowego z próby dla każdego iskiernika (rozdział 'Metody opracowania wyników badań'),
- charakterystyki udarowe badanych iskierników (ostrzowego, płaskiego, kulowego), wykreślone na podstawie wykonanych pomiarów,
- wyniki obliczeń współczynników udarowych badanych iskierników, Sprawozdanie winno zawierać analizę uzyskanych wyników i wnioski płynące z wykonanych pomiarów.

#### 5. PYTANIA KONTROLNE

1. Jakie są przyczyny opóźnienia przeskoku w powietrzu?
2. Podać definicję 0- 50- i 100-procentowego napięcia przeskoku.
3. Co to jest charakterystyka udarowa?
4. W jaki sposób definiuje się współczynnik udaru?
5. Jakie znaczenie ma znajomość charakterystyki udarowej?
6. Omówić, w jaki sposób wyznacza się charakterystykę udarową układu izolacyjnego.
7. Jak wyznacza się współczynnik udaru układu izolacyjnego?
8. Podać sposób konstrukcji charakterystyki udarowej.
9. Wyjaśnić pojęcie koordynacji izolacji.

#### LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:

2, 3, 4, 8, 9, 15, 17.

# Ćwiczenie nr 11

## WYTWARZANIE I POMIARY NAPIĘĆ UDAROWYCH

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania generatora udarowego oraz wyznaczenie parametrów jego schematu zastępczego, parametrów generowanej fali udarowej i sprawności generatora.

### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

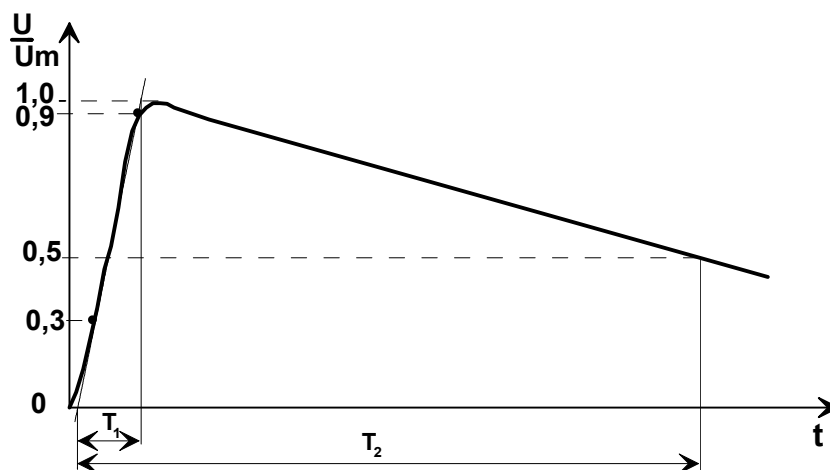
#### 2.1. Rodzaje i parametry napięć udarowych

W technice wysokonapięciowej rozróżnia się dwa typy udarów: piorunowe (krótkie) i łączeniowe (długie). Udar napięciowy jest impulsem jednej biegunowości (rys. 11.1), jego część wznosząca (krótsza) nazywana jest czołem, a opadająca (dłuższa) grzbietem udaru. Do podstawowych wielkości charakteryzujących przebiegi udarowe można zaliczyć:

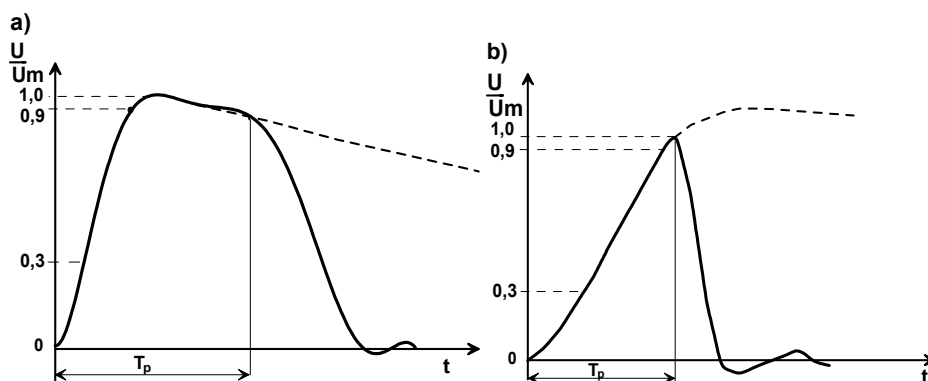
- wartość szczytową napięcia  $U_m$  (kV),
- czas trwania czoła  $T_1$  ( $\mu s$ ),
- czas do półszczytu na grzbiecie  $T_2$  ( $\mu s$ ),
- stromość udaru  $S = U_m/T$  (kV/ $\mu s$ ),
- biegunowość udaru ( dodatnia lub ujemna).

Dla celów probierczych stosowane są znormalizowane kształty udarów. Udar piorunowy ma  $T_1 = 1,2 \mu s$  ( $\pm 30\%$ ),  $T_2 = 50 \mu s$  ( $\pm 20\%$ ) i oznaczany jest 1,2/50. Podstawowy udar łączeniowy ma następujące parametry:  $T_1 = 250 \mu s$  ( $\pm 20\%$ ),  $T_2 = 2500 \mu s$  ( $\pm 60\%$ ), ale możliwe jest także stosowanie udarów o innych kształtach np. 100/2500, 500/2500.

Pod wpływem przeskoków może nastąpić ucięcie udaru. W niektórych przypadkach udary ucięte mogą powodować w izolacji większy wzrost naprężeń, niż ma to miejsce przy pełnych udarach. Stąd do badania izolacji transformatorów stosuje się udary ucięte na grzbiecie lub ucięte na czole, tzw. ukośne (rys. 11.2). Czas ucięcia (na rys. 11.2. oznaczony jako  $T_p$ ) jest znormalizowany i wynosi (2-5)  $\mu s$ .



Rys. 11.1. Przebieg typowego udaru napięciowego i jego parametry



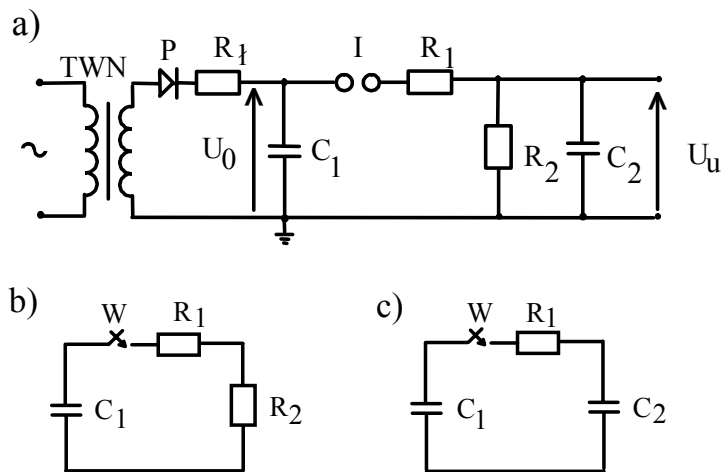
Rys. 11.2. Przebiegi udarów piorunowych uciętych: na grzbiecie (a) i na czole (b)

## 2.2. Generatory udarów napięciowych

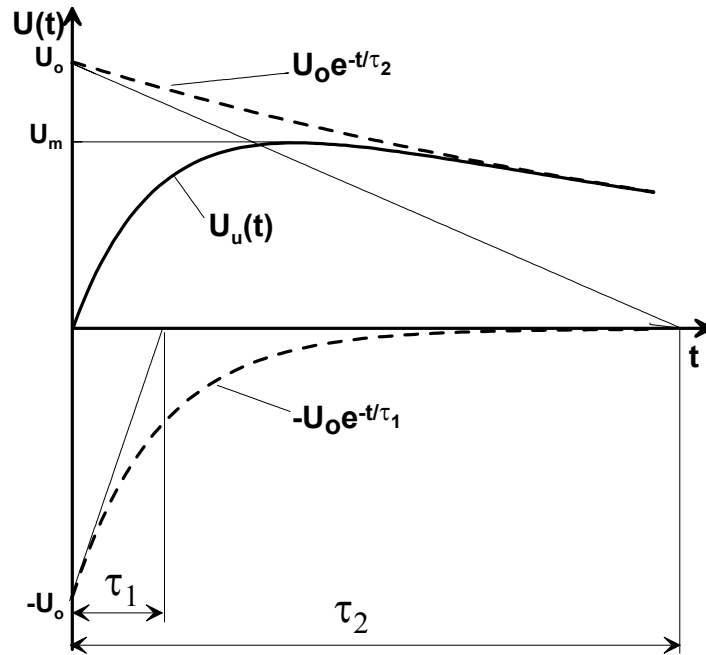
Napięcie udarowe o określonym kształcie można uzyskać w układzie podanym na rys. 11.3a. Kondensator  $C_1$  jest stopniowo ładowany ze źródła wysokiego napięcia stałego przez rezystancję  $R_1$  do napięcia  $U_0$ . Kiedy jego wartość przekroczy napięcie wytrzymawane przez iskiernik  $I$ , następuje przeskok. Rozpoczynają się wówczas i nakładają na siebie dwa procesy: rozładowanie pojemności  $C_1$  w obwodzie z rys. 11.3b i ładowanie pojemności  $C_2$  w obwodzie z rys. 11.3c. Przebiegi napięcia rozładowania (krzywa  $U_0 e^{-t/\tau_2}$ ),

napięcia ładowania (krzywa  $-U_0 e^{-t/\tau_1}$ ) oraz przebieg napięcia wypadkowego  $U_u(t)$  przedstawiono na rys. 11.4. Wraz z zanikiem udaru iskiernik gaśnie, następuje ponowne ładowanie pojemności  $C_1$  i proces może być powtórzony. Kształt napięcia wyjściowego  $U_u$  można zmieniać przez odpowiedni dobór parametrów układu  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ . Analiza obwodu z rys. 11.3 pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- czas czoła udaru  $T_1$  jest uzależniony od stałej czasowej ładowania kondensatora  $C_2$  ( $\tau_1 \cong R_1 C_2$ ),
- czas do półszczytu udaru  $T_2$  jest zależny od stałej czasowej rozładowania pojemności  $C_1 + C_2$  ( $\tau_2 \cong R_2 (C_1 + C_2)$ ),
- wartość szczytowa udaru  $U_m$  zależy od napięcia przeskoku iskiernika  $I$  (można ją regulować zmieniając odległość kul iskiernika),
- ustawienie prostownika P decyduje o biegunowości udaru (dodatniej lub ujemnej),
- częstość powtarzania udarów zależy od stałej czasowej ładowania  $R_1 C_1$  oraz napięcia  $U_0$  (wzrost napięcia i zmniejszenie stałej czasowej zwiększa częstość udarów),
- sprawność napięciowa generatora ( $\eta = U_m/U_0$ ) jest uzależniona od stosunku  $C_2/C_1$ ,  $R_1/R_2$  i kształtu udaru. Generator posiada dużą sprawność, jeżeli spełnione są warunki  $C_1 \gg C_2$  oraz  $R_2 \gg R_1$ .



**Rys. 11.3.** Zasada działania generatora udarowego jednostopniowego: a) schemat układu, b) obwód rozładowania pojemności  $C_1$ , c) obwód ładowania pojemności  $C_2$



Rys. 11.4. Przebiegi napięcia w generatorze udarowym jednostopniowym

W schemacie zastępczym generatora udarowego (rys. 11.3c) nie uwzględniono wpływu indukcyjności  $L$  obwodu ładowania pojemności  $C_2$ . Jeżeli nie są spełnione warunki eliminacji drgań (w zależności od wartości  $L/C$ ), to w obwodzie powstają przebiegi oscylacyjne, powodujące odkształcenie udaru.

Wartości szczytowe udarów uzyskiwane w generatorach jednostopniowych dochodzą do 200 kV. Rozszerzenie zakresu napięciowego jest możliwe dzięki zastosowaniu większej liczby stopni. W generatorach wielostopniowych (rys. 11.5) kondensatory poszczególnych stopni są ładowane ze źródła napięcia stałego w układzie równoległym, przez rezystancje  $R'_m$  i  $R''_m$ . Zapłon iskierników umożliwia ich rozładowanie w układzie szeregowym przez rezystancje  $R_b$ ,  $R_3$  i  $R_r$ . Aby obliczyć parametry udaru napięciowego, należy wyznaczyć parametry zastępcze generatora. Wypadkową rezystancję kształtującą czoło oblicza się ze wzoru:

$$R_1 = nR_t + R_3, \quad (11.1)$$

gdzie:

$n$  – liczba stopni.

Wypadkowa rozładowująca rezystancja wynosi:

$$R_2 = \frac{nR_m''(nR_m' + R_o)}{nR_m'' + nR_m' + R_o} \quad (11.2)$$

Zastępcze pojemności układu oblicza się za pomocą wzorów:

$$C_1 = \frac{C}{n} \quad (11.3)$$

$$C_2 = C_{ob} + C_{20} \quad (11.4)$$

Maksymalne napięcie wypadkowe na wyjściu generatora wynosi:

$$U_m = n \cdot \eta \cdot U_o \quad (11.5)$$

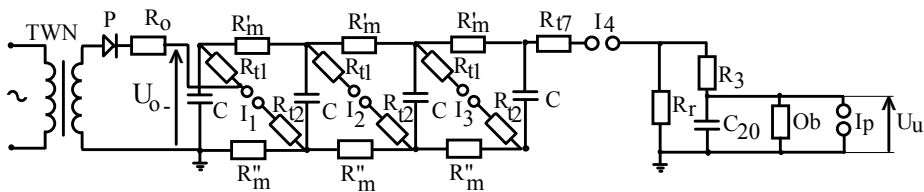
gdzie :

$\eta$  – sprawność generatora.

Charakterystyczne czasy udaru można obliczyć z przybliżonych wzorów:

$$T_1 = 2,5 \cdot R_1 \cdot C_2 \quad (11.6)$$

$$T_2 = 0,7(R_1 + R_r)(C_1 + C_2) \quad (11.7)$$



Rys. 11.5. Schemat czterostopniowego generatora udarowego Marksa

Natomiast sprawność generatora oblicza się za pomocą zależności:

$$\eta \cong \frac{0,97}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}} \quad (11.8)$$

### 2.3. Pomiar napięć udarowych

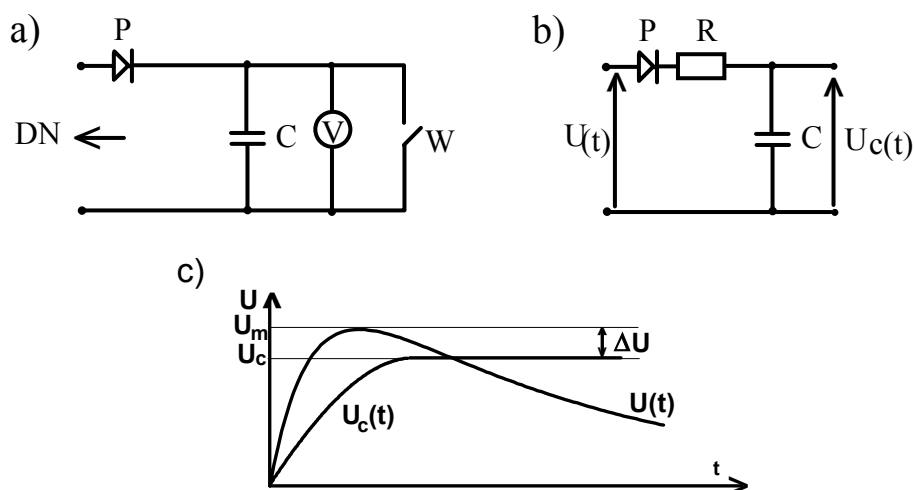


Przy przebiegach udarowych pomiarom podlegają: wartość szczytowa  $U_m$ , czas trwania czoła  $T_1$ , czas do półszczytu  $T_2$  oraz przekładnia  $\mathcal{G}$ . Do bezpośrednich pomiarów wartości szczytowej napięć udarowych wykorzystuje się iskiernik kulowy. Pomiar polega na znalezieniu takiego odstępów między elektrodami, dla którego z serii przyłożonych udarów o takiej samej wartości szczytowej połowa wywoła przeskok. Napięcie to odpowiada pięćdziesięcioprocentowemu napięciu przeskoku ( $U_{pu50\%}$ ). Jeżeli warunki atmosferyczne podczas pomiarów różnią się od warunków normalnych ( $T = 293,2 \text{ K}$ ,  $p = 1013 \text{ hPa}$ ), należy uwzględnić ich wpływ na mierzone napięcie.

Podczas pomiarów wartości szczytowej wykorzystuje się również metody pośrednie: miernikową, oscylograficzną i cyfrową. Schematy wyjaśniające zasadę działania mierników wartości szczytowej przedstawiono na rys. 11.6.

Z dolnego członu dzielnika napięcia, przez prostownik P wyprowadza się mierzony przebieg napięcia. Kondensator  $C$  ładuje się do wartości  $U_m$  tego przebiegu. Zgromadzony ładunek nie może szybko odpłynąć, co pozwala na pomiar napięcia woltmierzem elektrostatycznym. Po odczytaniu wartości napięcia, kondensator można rozładować zamykając wyłącznik  $W$ .

Przy szybkozmiennych napięciach problem stanowi duża stała czasowa ładowania kondensatora ( $\tau = RC$ ) wynikająca ze znacznej wartości oporności od strony źródła (rys. 11.6b).



**Rys. 11.6.** Schematy układów miernika wartości szczytowej (a, b) i odpowiadające przebiegi napięć (c)

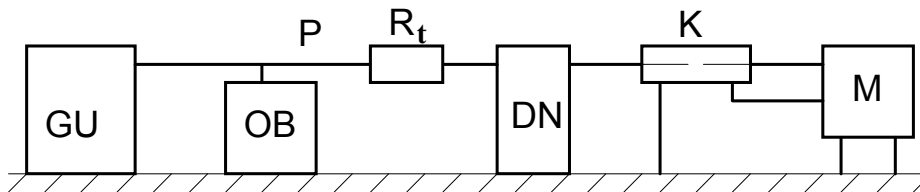
Duża stała czasowa ( $\tau = RC$ ) powoduje opóźnienie ładowania pojemności w stosunku do amplitudy mierzonego napięcia, co prowadzi do błędów pomiaru:

$$\delta = \frac{U_m - U_c}{U_m} \quad (11.9)$$

Ładunek z kondensatora  $C$  o niewielkiej pojemności, pełniącego rolę pamięci analogowej, dość szybko upływa przez prostownik  $P$ , co jest spowodowane jego zbyt małą opornością w kierunku zaporowym. Jest to źródło o dużej niedokładności pomiaru. Zwykle stosuje się dodatkowo układy elektroniczne (np. tranzystor polowy) lub mechaniczne (kontaktron), które odcinają diodę od kondensatora z chwilą, gdy napięcie osiągnie na nim wartość szczytową. Zapobiega to jego rozładowaniu.

Obserwację i pomiar wszystkich parametrów napięcia udarowego umożliwiają oscylografy (z pamięcią analogową lub cyfrową), które charakteryzują się dużą szybkością zapisu i dużą energią strumienia elektronów. Mierzony przebieg może utrzymywać się na ekranie od kilku do kilkudziesięciu minut. Może być również zapamiętywany po wyłączeniu zasilania nawet przez kilkadziesiąt godzin.

Na rys. 11.7 przedstawiony został schemat blokowy układu probierczo-pomiarowego, stosowanego przy napięciach udarowych. Dzielnik napięcia znajdujący się w polu probierczym jest ze względów bezpieczeństwa oddalony od przyrządu pomiarowego. Elementem łączącym jest kabel o uziemionym ekranie, który chroni układ pomiarowy przed działaniem pól elektrycznych.



**Rys. 11.7** Schemat blokowy układu probierczo-pomiarowego. GU - generator udarowy, OB - obiekt badany, P - przewód,  $R_t$  - rezystancja tłumiąca, DN - dzielnik napięcia, K - kabel pomiarowy, M - przyrząd pomiarowy

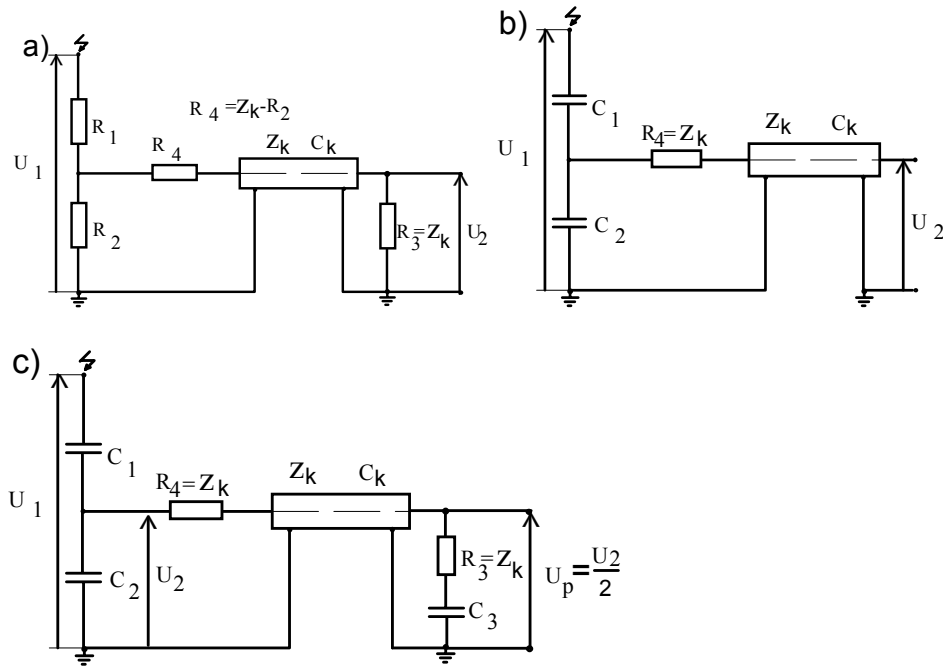
W celu eliminacji odkształceń napięcia, powodowanych odbiciem fal na końcach współosiowego kabla pomiarowego, stosuje się odpowiednie układy połączeń dzielnika napięcia z przyrządem pomiarowym (rys. 11.8).

W układzie z dzielnikiem rezystancyjnym odbicia na końcach kabla eliminuje się włączając dodatkowe rezystancje  $R_3 = Z_k$  i  $R_4 = Z_k - R_2$ .

Uwzględniając ich wpływ, przekładnię oblicza się według wzoru:

$$\rho = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2 R_3} \quad (11.10)$$

Jeżeli przyłączony do układu przyrząd ma dużą pojemność, konieczne jest dopasowanie  $R_4 + R_2 = Z_k$ .



**Rys. 11.8.** Schematy połączeń układu pomiarowego: z dzielnikiem rezystancyjnym (a), z dzielnikiem pojemnościowym i kablem o małej pojemności (b), z dzielnikiem pojemnościowym i kablem o dużej pojemności (c)

W układzie z dzielnikiem pojemnościowym możliwe są dwa przypadki:

- układ z krótkim kablem pomiarowym (o małej pojemności  $C_k$ ) i szeregowym rezystorem  $R_4 = Z_k$  (rys. 11.8b),
- układ z długim kablem pomiarowym (o dużej pojemności  $C_k$ ), szeregowym rezystorem  $R_4 = Z_k$  oraz elementami dopasowującymi  $R_3 = Z_k$  i  $C_3 = C_1 + C_2 - C_k$  (rys. 11.8c).

W układzie przedstawionym na rys. 9.8b przekładnia zmienia się w zakresie od:

$$g = \frac{C_1 + C_2}{C_1}, \quad (11.11)$$

dla czoła udaru, do

$$g = \frac{C_1 + C_2 + C_k}{C_1}. \quad (11.12)$$

dla grzbietu udaru. Dla układu przedstawionego na rys. 9.8c przekładnię (przy założeniu, że  $R_3 = R_4 = Z_k$  i  $C_3 = C_1 + C_2 - C_k$ ) można wyrazić jako:

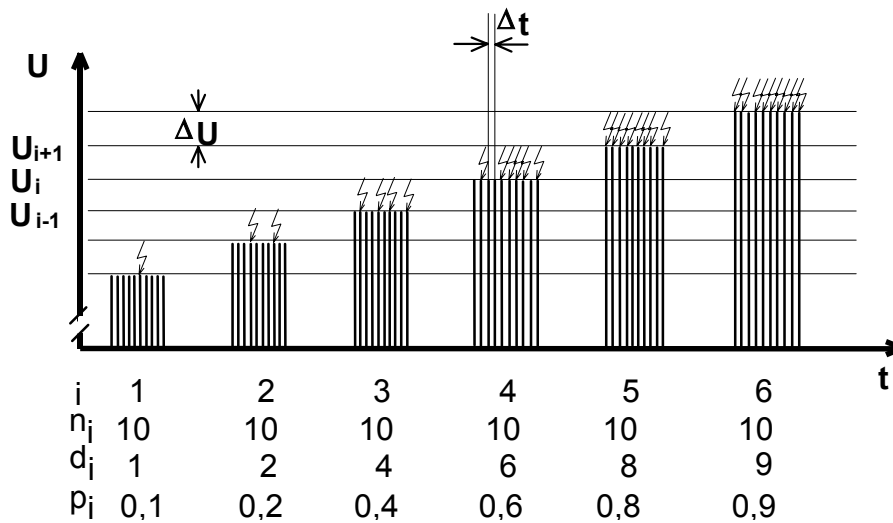
$$g = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_k}{C_1}. \quad (11.13)$$

#### 2.4. Pomiar udarowego napięcia przeskoku metodą serii i metodą góra-dół

W celu określenia metryki układu izolacyjnego ( $U_{p50\%}$  i standardowe odchylenie z próby) stosuje się metodę serii. Metoda ta polega na doprowadzeniu do badanego układu  $m_i$  serii udarów o liczebności  $n$  i takich samych napięciach szczytowych. Podczas badań obserwuje się liczbę doprowadzeń napięcia  $d_i$ , przy których wystąpił przeskok (rys. 11.9). Z każdej serii szacuje się prawdopodobieństwo przeskoku określone wzorem (11.14). Zazwyczaj wymaga się, aby  $m_i \geq 4$  dla prawdopodobieństwa przeskoku w zakresie  $0,02 \leq p_i \leq 0,98$ .

$$p_i = \frac{d_i}{n} \quad (11.14)$$

Następnie należy wykreślić zależność  $p_i$  od  $U_i$  na specjalnej siatce funkcyjnej rozkładu normalnego. Wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów (opisaną w rozdziale „Metody opracowania wyników badań”), należy wyznaczyć prostą regresji, a następnie określić  $U_{p50\%}$  i odchylenie standardowe z próby.



Rys. 11.9. Schematyczne przedstawienie procedury badań metodą serii

Druga z metod polega na doprowadzeniu do badanego układu takiego napięcia, które spowoduje przeskok, a następnie doprowadzeniu kolejnych 20 udarów różniących się wartościami szczytowymi napięcia o  $\Delta U$  (tzw. krok napięciowy). Jeżeli doprowadzony udar spowoduje przeskok, kolejny powinien mieć napięcie obniżone o  $\Delta U$ . W przypadku, gdy udar nie zakończy się przeskokiem, wartość kolejnego należy zwiększyć o  $\Delta U$ . Napięcie  $U_{p50\%}$  wyznacza się ze wzoru:

$$U_{p50\%} = U_o + \Delta U \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m i \cdot n_i \pm 0,5 \right), \quad (9.14)$$

gdzie:

- $U_o$  – poziom zerowy wyznaczony wartością szczytową napięcia przed pierwszym przeskokiem,
- $N$  – mniejsza z dwóch liczb oznaczających liczbę przeskoków (we wzorze znak jest wówczas ujemny), bądź liczbę udarów nie zakończonych przeskokiem,
- $m$  – liczba poziomów napięciowych, różniących się o wartość  $\Delta U$ ,
- $n_i$  – liczba prób związanych z wyborem liczby  $N$ .

### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

#### 3.1. Zadania do wykonania

1. Przeprowadzić skalowanie układu pomiarowego za pomocą iskiernika kulowego i woltomierza elektrostatycznego (lub mikroamperomierza i opornika pomiarowego).
2. Obliczyć parametry schematu zastępczego i charakterystyczne czasy ( $T_1$ ,  $T_2$ ) udarów otrzymywanych z generatora według wzorów od (11.1) do (11.7).
3. Zaobserwować kształt udaru na oscylogramie. Zmierzyć wartości  $U_m$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , dobierając odpowiednio szybkość podstawy czasu. Określić biegunowość udaru.
4. Obliczyć sprawność generatora korzystając ze wzoru (11.8).
5. Określić sprawność napięciową generatora w zależności od wartości szczytowej udarów ( $\eta = \frac{U_m}{4U_0}$ ).
6. Metodą serii wyznaczyć pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku izolatora liniowego przy użyciu iskiernika kulowego ( $\phi = 12,5$  cm).

#### 3.2. Sposób przeprowadzenia pomiarów i układ pomiarowy

Pomiary należy przeprowadzić przy użyciu czterostopniowego generatora w układzie Marksa (rys. 11.5), będącego na wyposażeniu Laboratorium TWN.

Skalowanie układu pomiarowego polega na określeniu zależności między wartością szczytową udarów a wskazaniem woltomierza elektrostatycznego (lub wskazań mikroamperomierza z szeregowym opornikiem) mierzącego napięcie ładowania kondensatorów. Skalowanie należy przeprowadzić dla odstępów między elektrodami iskiernika pomiarowego wynoszących: (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5) cm. Dla każdej odległości między elektrodami należy znaleźć wartość szczytową udarów, przy której liczba przeskoków na iskierniku pomiarowym wyniesie 50% liczby doprowadzonych udarów. Wartość  $U_{p50\%}$  można wyznaczyć przez interpolację liniową z dwóch wartości napięcia, z których jedna odpowiada 1-2 przeskokom na 10 kolejnych udarów, druga 8-9 przeskokom na 10 udarów.

W celu określenia sprawności napięciowej generatora w zależności od wartości szczytowej udarów, należy dla różnych odległości między elektrodami iskiernika zapalającego zmierzyć woltomierzem elektrostatycznym napięcie ładowania  $U_0$  i iskiernikiem kulowym napięcie na wyjściu generatora  $U_m$ .

Wyznaczenie pięćdziesięcioprocentowego napięcia przeskoku izolatora liniowego należy przeprowadzić metodą serii, przyjmując  $m=5$ ,  $n=20$ . Najpierw drogą prób należy wyregulować wartość napięcia generatora tak, aby na serię 20 udarów wystąpił 1 lub 2 przeskoki na izolatorze. Następnie należy, po każdej serii, zwiększać wartość szczytową napięcia o (1-2)% poprzedniej wartości i obserwować liczbę przeskoków  $d_i$ . Próby przeprowadzać aż do momentu, gdy na serię 20 udarów nastąpi 18-19 przeskoków.

### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Protokół powinien zawierać następujące dane ogólne: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących, datę wykonywania ćwiczenia, ciśnienie i temperaturę otoczenia, dane znamionowe przyrządów wykorzystywanych w ćwiczeniu, uwagi i spostrzeżenia przydatne przy opracowywaniu sprawozdania. Ponadto protokół powinien zawierać:

- wyniki obliczeń parametrów schematu zastępczego oraz wartości:  $U_m$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  i  $\eta$ ,
- wyniki pomiarów skalowania układu pomiarowego,
- wyniki pomiarów wartości  $U_m$ ,  $T_1$  i  $T_2$ ,
- wyniki pomiarów wartości  $U_0$ ,  $U_m$  dla różnych odległości kul iskiernika zapalającego oraz obliczeń  $\eta$ ,
- wyniki pomiarów liczby przeskoków w serii 20 udarów dla różnej wartości napięcia doprowadzonego do izolatora.

Protokół z wynikami pomiarowymi powinien być potwierdzony podpisem przez prowadzącego ćwiczenie.

Przykładowe tabele pomiarowe:

**Tabela 11.1.**

Skalowanie układu pomiarowego

Lp.	a	$U_0$	$U_{pn}$	$U_{p\delta}$
	mm	kV	kV	kV
1				
2				
3				

**Tabela 11.2.**

Pomiary sprawności generatora

Lp.	$U_0$	a	$U_{mn}$	$U_{m\delta}$	$\eta$
	kV	mm	kV	kV	-
1					
2					
3					

**Tabela 11.3.**

Pomiary napięcia przeskołu izolatora metodą serii

i	$n_i$	$d_i$	$p_i$	$U_{mi}$
-	-	-	-	kV
1				
2				
3				

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonywanego ćwiczenia należy przygotować sprawozdanie, jedno dla całej sekcji. Sprawozdanie powinno zawierać standardowe dane osób wykonujących ćwiczenie oraz dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto sprawozdanie powinno obejmować:

- krótki wstęp teoretyczny dotyczący ćwiczenia (nie więcej niż jedną stronę),
- wyniki obliczeń parametrów schematu zastępczego oraz wartości:  $U_m$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  i  $\eta$ ,
- tabele z wynikami pomiarów, przeliczonymi na warunki normalne
- wykresy udarów wykonane na podstawie obliczeń kształtów udarów (wzory 11.1 do 11.7),
- wykresy lub zdjęcia udarów wygenerowanych na generatorze udarowym podczas wykonywania ćwiczenia, zaobserwowane na oscyloskopie,
- wykres rzeczywistej charakterystyki sprawności generatora w funkcji  $U_m$ ,
- wykres zależności prawdopodobieństwa przeskołu w funkcji napięcia, obliczenia  $U_{p50\%}$  i odchylenia standardowego (sposób obliczenia podano w rozdziale „Metody opracowania wyników badań”) dla izolatora liniowego.

Sprawozdanie powinno zawierać analizę uzyskanych wyników i wnioski z pomiarów. W analizie wyników należy porównać parametry udarów otrzymane z obliczeń i pomiarów. Należy ocenić wpływ wartości napięcia zasilającego na sprawność generatora oraz porównać sprawność generatora określoną na podstawie pomiarów, ze sprawnością obliczoną teoretycznie.

**Tabela 11.4.**



Wartości szczytowe 50% napięcia przeskoku w normalnych warunkach atmosferycznych ( $p = 1013 \text{ hPa}$ ,  $t = 20^\circ\text{C}$ ) o kształcie odpowiadającym udarowi normalnemu, dla iskiernika kulowego

Odstęp kul a [cm]	Średnica kul D [cm]							
	Biegunowość ujemna				Biegunowość dodatnia			
	5	6,25	10	12,5	5	6,25	10	12,5
0,6	20,4	20,2	19,9	19,9	20,4	20,2	19,9	19,9
0,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,3	26,0	26,0	26,0
1,0	32,0	31,9	31,7	31,7	32,0	31,9	31,7	31,7
1,2	37,6	37,5	37,4	37,4	37,8	37,6	37,4	37,4
1,4	42,9	42,9	42,9	42,9	43,3	43,2	42,9	42,9
1,6	48,1	48,1	48,1	48,1	49,0	48,6	48,1	48,1
1,8	53,0	53,5	53,5	53,5	54,5	54,0	53,5	53,5
2,0	57,5	58,5	59,5	59,5	59,5	59,0	59,5	59,5
2,2	61,5	63,0	64,5	64,5	64,0	64,0	64,5	64,5
2,4	65,5	67,5	69,5	70,0	69,0	69,0	70,0	70,0
2,6	69,0	72,0	74,5	75,0	-	73,5	75,5	75,5
2,8	-	76,0	79,5	80,0	-	78,0	80,5	80,5
3,0	-	79,5	84,0	85,0	-	82,0	85,5	85,5
3,5	-	-	95,0	97,0	-	-	97,5	98,0
4,0	-	-	105	108	-	-	109	110
4,5	-	-	115	119	-	-	120	122
5,0	-	-	123	129	-	-	130	134

## 5. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Zdefiniować pojęcie napięcia udarowego, narysować jego charakterystykę.
2. Podać charakterystyczne parametry udaru napięciowego.
3. Omówić zasadę działania generatora udarowego.
4. W jaki sposób można kształtować parametry oraz częstość powtarzania udarów?
5. Omówić metody pomiaru i rejestracji udarów napięciowych.
6. W jaki sposób określa się sprawność napięciową generatora?
7. Omówić sposób wyznaczania 50% napięcia przeskoku izolatora liniowego.

## LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:

2, 3, 4, 8, 9, 15, 17.

## Ćwiczenie nr 14

# BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ DIELEKTRYKÓW STAŁYCH

### 1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą badania napięcia przebicia dielektryków stałych i wpływem grubości materiału na jego wytrzymałość elektryczną.

### 2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

#### 2.1. Wprowadzenie

Przebiecie dielektryka stałego, w przeciwieństwie do cieczy i gazów, wiąże się z całkowitą utratą zdolności izolacyjnych. Miarą wytrzymałości dielektryka stałego jest natężenie pola elektrycznego lub napięcie, przy którym dochodzi do przebicia w określonych warunkach pracy lub próby laboratoryjnej. Określenie parametrów krytycznych ( $E_p, U_p$ ) jest często kłopotliwe ze względu na trudności w utrzymaniu powtarzalności warunków narażeniowych. Kolejny problem stanowi często brak korelacji między wytrzymałością dielektryka a wytrzymałością układu izolacyjnego, w którym został zastosowany. Wynika to ze zmiany warunków, w których wytrzymałość jest badana. Należy tu wymienić m.in. zmiany geometrycznych kształtów, a w związku z tym naprężeń występujących w izolacji, a także szereg innych czynników, które wymieniono w rozdz. 2.2.

#### 2.2. Czynniki wpływające na wytrzymałość dielektryków stałych

Wyniki badań wytrzymałości elektrycznej dielektryków stałych mogą być pomocne w wykrywaniu zmian bądź odchyłeń od normalnych charakterystyk, spowodowanych zmianami w procesie produkcyjnym lub warunkami narażeniowymi powodującymi starzenie. Trzeba zdawać sobie sprawę, że mierzone wartości wytrzymałości elektrycznej materiałów są uzależnione od bardzo wielu czynników, których wpływ może być bardzo różny w zależności od własności danego materiału.

Wśród czynników mających wpływ na wytrzymałość należy wymienić:

- częstotliwość, kształt fali, prędkość podnoszenia i czas przyłożenia napięcia,
- grubość i występujące niejednorodności próbki, a także występujące naprężenia mechaniczne,
- wcześniejsze działania np. procesu suszenia i impregnacji materiału,
- temperaturę, ciśnienie i wilgotność otoczenia,
- obecność wilgoci, wtrącin gazowych i wszelkich zanieczyszczeń stałych,
- układ (kształt), wymiary i przewodność cieplną stosowanych elektrod,
- intensywność wyładowań powierzchniowych poprzedzających przebicie,
- objętość bądź powierzchnię między elektrodami będącą pod maksymalnym natężeniem pola elektrycznego,
- właściwości elektryczne i cieplne środowiska otaczającego badany dielektryk.

### 2.3. Mechanizmy przebicia dielektryków

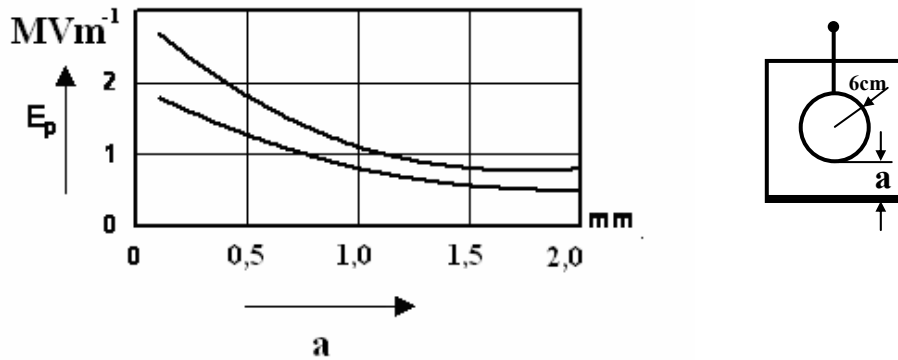
W zależności od czasu oddziaływania naprężeń oraz zachodzących procesów wyróżnia się trzy podstawowe mechanizmy przebicia dielektryków stałych:

- mechanizm czysto elektryczny (przebicia istotnego) występujący w czasie krótszym niż 1s,
- mechanizm cieplny, występujący w czasie koniecznym do pojawienia się skutków niestabilności cieplnej, tzn.  $(1-10^4)$ s,
- mechanizm jonizacyjno-starzeniowy związany ze stopniową degradacją własności izolacyjnych materiału pod wpływem wyładowań niepełnych (WZN) lub spowodowany zmianami chemicznymi i elektrochemicznymi zachodzącymi w dielektryku.

Mechanizm ściśle elektryczny może zaistnieć tylko wówczas, gdy dielektryk ma jednorodną strukturę, brak w nim zanieczyszczeń, a także nie ma możliwości, aby doszło do jakichkolwiek procesów przedprzebicowych (ze względu na krótkotrwałe oddziaływanie napięcia). Rozwój wyładowania jest uzależniony tylko od właściwości samego dielektryka i temperatury. Należy jednak podkreślić, że chociaż przebicie elektryczne wywołuje nagrzanie dielektryka, to nie jest zainicjowane i nie wiąże się z ciepłem wydzielonym w wyniku przepływu prądu przez dielektryk przed przebicciem. Głównymi cechami przebicia elektrycznego są:

- występowanie przebicia w niskiej temperaturze (tzn. pokojowej lub niższej),
- niezależność natężenia przebicia od materiału elektrod,

- niezależność wytrzymałości od kształtu krzywej napięcia (ponieważ przebicie następuje w czasie mikrosekund lub krótszym),
- duża zależność wytrzymałości od grubości dielektryka przy jej małych wartościach i niewielka dla większych grubości (rys.14.1).



Rys. 14.1. Zależność wytrzymałości elektrycznej etylenu (1) i żywicy epoksydowej (2) od grubości próbki

Teoria przebicia czysto elektrycznego łączy w sobie teorię przebicia swoistego z teorią przebicia lawinowego, które wzajemnie się dopełniają. Pierwsza pozwala wyznaczyć wartość pola elektrycznego, przy którym jonizacja zderzeniowa staje się czynnikiem dominującym w narastaniu prądu. Druga z kolei pozwala wyjaśnić, jak ładunki powstałe na skutek jonizacji zderzeniowej prowadzą do narastania wartości prądu aż do przebicia. Wyładowanie elektryczne ma charakter elektronowy i może wystąpić, gdy natężenie pola osiąga poziom  $10^3 \text{ kV/cm}$ . Konieczne jest również istnienie co najmniej jednego elektronu w paśmie przewodnictwa, stąd niezbędne jest dostarczenie mu przez pole elektryczne energii potrzebnej do pokonania pasma zabronionego oraz dodatkowej porcji  $\Delta W > 0$ , koniecznej do zapoczątkowania jonizacji zderzeniowej. Wzrost natężenia pola elektrycznego do poziomu krytycznego  $E_k$  jest związany ze zwiększeniem się temperatury elektronów ( $T_e$ ) oraz temperatury dielektryka w obrębie kanału wyładowania ( $T_d$ ) do wartości krytycznej:

$$T_k = T_e \geq T_d, \quad (14.1)$$

czemu towarzyszy zwiększenie się liczby elektronów w paśmie przewodnictwa do takiego poziomu, że istotnie zwiększa się przewodność dielektryka, a maleje jego wytrzymałość, co w konsekwencji kończy się przebicciem.

Krytyczną wartość natężenia pola elektrycznego, przy której dochodzi do przebicia czysto elektrycznego określa się mianem wytrzymałości istotnej, którą można obliczyć z zależności (14.2):

$$E_k = C \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2 \cdot k \cdot T_k}\right), \quad (14.2)$$

gdzie:

- $E_k$  – wytrzymałości istotna,
- $C$  – stała zależna od dielektryka,
- $\Delta W$  – szerokość pasma dodatkowych poziomów dozwolonych dyskretnie,
- $T_k$  – temperatura krytyczna,
- $k$  – stała Boltzmana.

Poziom wytrzymałości istotnej dielektryków stałych jest uzależniony od wielu czynników, takich jak: technika przygotowania próbek, materiał katody, koncentracja defektów i domieszek. Sprawia to, że często nie ma pewności, jaki mechanizm przebicia wystąpił i czy zmierzona wytrzymałość odnosi się na pewno do określonej mianem istotnej, czy też do wytrzymałości innego rodzaju.

Mechanizm cieplny wiąże się z nagrzewaniem się dielektryka spowodowanym prądami upływu i stratami polaryzacyjnymi. Do przebicia cieplnego dochodzi w przypadku zachwiania równowagi termicznej polegającej na wytwarzaniu większej ilości ciepła ( $Q_1$ ) pod wpływem przyłożonego napięcia ( $U$ ), od ciepła odprowadzanego do otoczenia ( $Q_2$ ). Ciepło wytwarzane zależy od wartości napięcia ( $Q_1'' > Q_1' > Q_1$  dla  $U'' > U > U'$ ). Kumulujące się w dielektryku ciepło ( $Q_T$ ) powoduje wzrost jego temperatury i może prowadzić do nieodwracalnych zmian w strukturze fizykochemicznej i znacznego obniżenia wytrzymałości elektrycznej. Przebicie cieplne w dielektryku jest związane z przepływem prądu jonowego w wytworzonym małorezystancyjnym kanale wyładowania. Kanał taki tworzy się w miejscach najbardziej nagrzanych, gdzie w związku z tym występuje największa przewodność skośna. Na rys. 14.2a przedstawiono charakterystyki zmian ciepła pobranego przez dielektryk (wydzielonego w układzie)  $Q_1$  i oddanego  $Q_2$  od temperatury. Punkty zaznaczone na charakterystyce określają stan równowagi stabilnej ( $T_1$ ) i niestabilnej ( $T_2$ ), kiedy  $Q_T=0$ . Równanie opisujące bilans cieplny w dielektryku można przedstawić w postaci:

$$Q_1 = Q_2 + Q_T. \quad (14.3)$$

Dla najgorętszego elementu dielektryka, w którym natężenie pola wynosi  $E$ , równanie opisujące przebicie cieplne przyjmuje postać, dla napięcia stałego [4]:

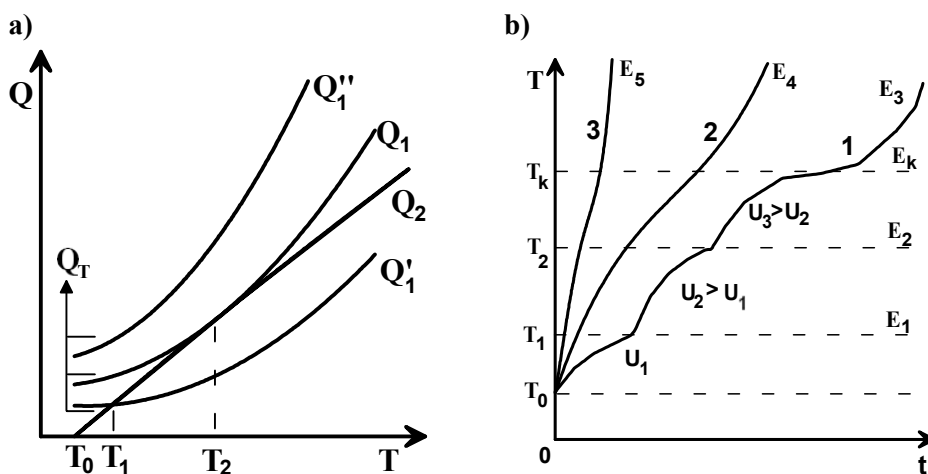
$$\gamma E^2 = c_v \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{d^2T}{dx^2}, \quad (14.4)$$

a dla napięcia przemiennego:

$$\omega \varepsilon'' C_0 E^2 = c_v \frac{dT}{dt} - \lambda \frac{d^2T}{dx^2}, \quad (14.5)$$

gdzie:

- $\gamma$  – konduktywność dielektryka,
- $\omega$  – pulsacja napięcia przemiennego,
- $\varepsilon''$  – składowa urojona przenikalności elektrycznej zespolonej,
- $c_v$  – pojemność cieplna właściwa dielektryka,
- $T$  – temperatura,
- $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa dielektryka.



**Rys. 14.2.** Zależność: a) ciepła wydzielanego  $Q_1$  i oddanego  $Q_2$  od temperatury  $T$ ; b) temperatury  $T$  od czasu oddziaływania naprężeń i ich poziomu

W praktyce znacznie więcej ciepła wydziela się przy napięciu przemiennym niż przy stałym. Stąd zagrożenie przebiegiem cieplnym występuje tylko przy napięciu przemiennym.

Na rys.14.2b przedstawiono zależność zmian temperatury dla różnych wartości natężenia pola elektrycznego. Krzywa 1 obrazuje stopniowe zmiany warunków ustalonych, przy stopniowym wzroście napięcia  $U$ , a tym samym natężenia pola elektrycznego. Temperatry  $T_1$  i  $T_2$  odpowiadają stanom równowagi cieplnej dielektryka. Po przekroczeniu temperatury krytycznej  $T_k$  doprowadzone do

układu napięcie odpowiada napięciu przebicia cieplnego  $U_{pc}$ , które można wyznaczyć ze wzoru [4]:

$$U_{pc} = \sqrt{\frac{8\lambda}{\gamma_0} \int_{T_0}^{T_k} \exp\left(\frac{\alpha}{T}\right) dT}, \quad (14.6)$$

gdzie:

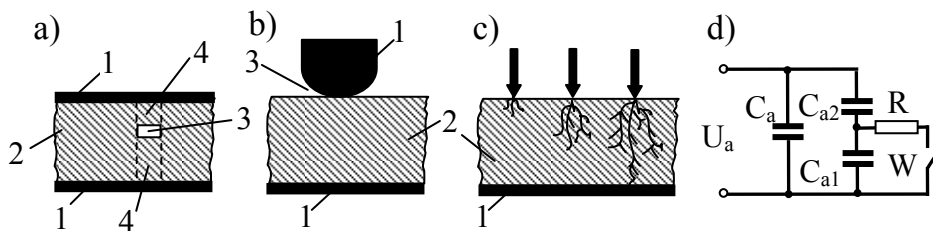
- $\alpha$  – współczynnik temperaturowy przewodności lub stratności,
- $\gamma_0$  – konduktywność dielektryka w temperaturze otoczenia,
- $T$  – temperatura,
- $T_0$  – temperatura otoczenia,
- $T_k$  – temperatura krytyczna,
- $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa dielektryka.

Z przedstawionej zależności wynika, że napięcie przebicia cieplnego, przy założeniu stałych wartości  $\alpha$  i  $\lambda$ , jest uzależnione od początkowej i krytycznej temperatury dielektryka, natomiast nie zależy od jego grubości. Pokazane na rys. 14.2b krzywe 2 i 3 obrazują szybki wzrost temperatury dielektryka, przy gwałtownym wzroście natężenia pola  $E$  powyżej wartości krytycznej. Jest to charakterystyczne dla napięć udarowych. W tym przypadku napięcie przebicia cieplnego ( $U_{pc}$ ) nie zależy od temperatury krytycznej i można je obliczyć ze wzoru [4]:

$$U_{pc} = \left(\frac{3 \cdot c_v}{\alpha \cdot \gamma \cdot t_k}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot a \cdot T_0 \exp\left(\frac{\alpha}{2 \cdot T_0}\right), \quad (14.7)$$

gdzie:

- $a$  – grubość dielektryka,
- $t_k$  – czas osiągnięcia temperatury krytycznej,
- $\gamma$  – konduktywność dielektryka,
- $\alpha$  – współczynnik temperaturowy przewodności lub stratności,
- $c_v$  – pojemność cieplna właściwa dielektryka,
- $T_0$  – temperatura otoczenia.



**Rys. 14.3.** Układ dielektryka z wtrąciną wewnętrzną (a), z wtrąciną zewnętrzną (b), z WNZ w postaci drzewienia (c) i schemat zastępczy izolacji z wtrąciną (d),  
1 - elektroda, 2 - dielektryk bez wtrącin ( $C_a$ ), 3 - wtrącina ( $C_{a1}$ ),  
4 - dielektryk sąsiadujący z wtrąciną ( $C_{a2}$ )

Mechanizm jonizacyjny jest konsekwencją występujących w układzie izolacyjnym wyładowań niezupełnych. WNZ mogą powstawać w różnych miejscach izolacji, ale zawsze stanowią jedną z trzech form wyładowań: ulotowe, powierzchniowe, we wtrącinach gazowych (wewnętrznych lub zewnętrznych). Przebieg procesu inicjacji i rozwoju wyładowań jest uzależniony od wielu czynników m.in.: struktury dielektryka, ilości i rodzaju wtrącin, rozkładu pola elektrycznego. Bez względu na formę wyładowania schemat zastępczy układu można przedstawić tak jak na rys. 14.3d. Ze względu na dużo mniejszą przenikalność wtrącin, w stosunku do przenikalności dielektryka graniczącego z nimi, natężenie pola elektrycznego jest w nich dużo większe i łatwo dochodzi do WNZ, w wyniku przekroczenia wytrzymałości gazu znajdującego się we wtrącinach. Napięcie występujące na wtrącinie można wyznaczyć ze wzoru:

$$U_{a1} = U_a \frac{C_{a2}}{C_{a1} + C_{a2}}, \quad (14.7)$$

Po podstawieniu pojemności  $C_{a1} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1 \cdot S}{a_1}$ ;  $C_{a2} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2 \cdot S}{a_2}$ , otrzymuje się zależność:

$$U_a = U_{a1} \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2} + \frac{\epsilon_1 \cdot a}{\epsilon_2 \cdot a_1} \right). \quad (14.8)$$

Wyładowanie we wtrącinie wystąpi po przekroczeniu natężenia krytycznego  $E_{k1} = \frac{U_{a1}}{a_1}$ , gdy napięcie zasilające osiągnie krytyczną wartość na poziomie:

$$U_{ak} = E_{k1} \left( \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2} + \frac{\epsilon_1 \cdot a}{\epsilon_2 \cdot a_1} \right). \quad (14.9)$$



Rozwój wyładowania może mieć przebieg przedstawiony na rys. 14.3c, gdzie począwszy od miejsca przy elektrodzie, w którym występuje największe napięcie, powstają przewodzące kanaliki tworzące kształty przypominające gałęzie drzewa, nazywane drzewieniem (z ang. treeing). Zjawisko przy intensywnym przebiegu może zakończyć się przebiciem. Jeżeli drzewienie zachodzi przy mniejszych natężeniach pola może zostać zahamowane i wówczas wytworzone kanały znacznie osłabiają dielektryk.

Przebiecie może mieć charakter czysto jonizacyjny i może nastąpić w wyniku kumulowania się przebić częściowych. Może również nastąpić w wyniku starzenia jonizacyjnego, które polega na długotrwałym oddziaływaniu na dielektryk WNZ o małej intensywności. Możliwe jest w tym przypadku starzenie bez wykrywalnej erozji bądź z erozją w postaci drzewienia (rys. 14.3c).

Kolejną przyczyną przebicia dielektryka jest starzenie cieplne, polegające na zmianach chemicznych w materiale. Jego przebieg jest uzależniony od temperatury, rodzaju i struktury dielektryka oraz obecności wody i tlenu. Proces starzenia może być opisany przez:

- krzywą degradacji - przedstawiającą zależność wielkości opisującej stan zesterzenia (np. wytrzymałości elektrycznej) od czasu starzenia, przy stałym poziomie narażeń),
- krzywą życia - będącą zależnością intensywności narażeń od czasu starzenia, przy krytycznym poziomie wielkości służącej do oceny stanu zesterzenia,
- czas życia układu ( $t_z$ ) – przedstawiający czas, po którym wielkość służąca do oceny stanu zesterzenia przyjmuje poziom krytyczny.

Czas życia dielektryka, dla narażeń termicznych, można przedstawić jako:

$$t_z = A \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (14.10)$$

gdzie:

- A, B – stałe zależne od rodzaju dielektryka i warunków pracy,
- T – temperatura pracy dielektryka.

Wzór 14.10 obrazuje prawo Montsingera dla izolacji organicznej, wg którego podwyższenie temperatury jej pracy o 8K wywołuje skrócenie czasu życia o połowę. Dla izolacji celulozowej, można zastosować wzór Montsingera w postaci:

$$t_z = t_0 \cdot \exp[-0,0865(T - 273)], \quad (14.11)$$

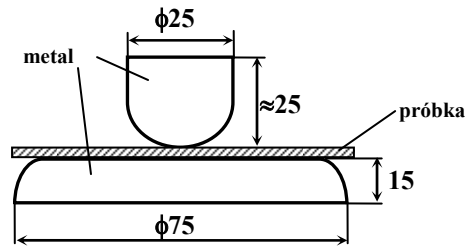
gdzie:

$t_0$  – czas życia w temperaturze początkowej, charakteryzującej dany rodzaj izolacji.

Przyczyną degradacji izolacji może być również starzenie elektrochemiczne, które jest rezultatem reakcji elektrochemicznych zachodzących w dielektrykach w obecności długotrwale oddziaływującego napięcia. Zachodzące procesy zależą od rodzaju dielektryka, rodzaju napięcia, zanieczyszczeń, temperatury i wilgoci. Pod wpływem zmian napięcia w dielektryku dochodzi do segregacji jonów na metaliczne i niemetaliczne. Jony metaliczne po zobojętnieniu ich przy elektrodach, mogą wnikać do dielektryka i tworzyć przewodzące kanały – dendryty. Z kolei jony niemetaliczne mogą po dojściu do elektrod i zneutralizowaniu się reagować z dielektrykiem, tworząc związki degradujące jego własności. Ważnym czynnikiem przyspieszającym starzenie elektrochemiczne jest obecność wody, która sprzyja tworzeniu się kanałów dendrytowych (podobnych do powstających w wyniku procesów jonizacyjnych). W wyniku zachodzącego starzenia maleje rezystywność kanału, wzrastają gęstość prądu upływu i straty dielektryczne, znacznie maleje wytrzymałość elektryczna. W rezultacie starzenie elektrochemiczne może doprowadzić do przebicia dielektryka przy znacznie niższym natężeniu pola elektrycznego w porównaniu do materiału niezestarzonego.

### **2.3. Badanie wytrzymałości dielektryków stałych**

Metoda badania dielektryków stałych jest unormowana (PN-IEC243). Wytrzymałość elektryczną, bądź napięcie przebicia danego materiału można badać w układzie o niejednakowych średnicach elektrod przedstawionym na rys. 14.4. W przypadku, gdy dostępny jest uchwyt umożliwiający dokładne ustawienie elektrod, można stosować również układ z dwiema mniejszymi elektrodami o średnicy 25 mm. W obu układach wymagane jest współosiowe ustawienie elektrod, a ich powierzchnia powinna być gładka, czysta i wolna od uszkodzeń. Istotne jest również, aby przewody doprowadzające napięcie nie wpływały znacząco na rozkład pola elektrycznego. Pomiar powinien być przeprowadzany w powietrzu, w otoczeniu, w którym normalnie dielektryk pracuje lub w oleju (w przypadku występowania przeskoków powierzchniowych).



**Rys. 14.4.** Schemat układu elektrod do badania wytrzymałości dielektryków stałych.  
Wymiary są podane w milimetrach

Należy zwrócić uwagę na parametry wykorzystywanego źródła napięcia. Powinno ono posiadać dostatecznie dużą moc, zapewniającą prąd zwarciaowy na poziomie 40 mA.

### 3. PROGRAM ĆWICZENIA

#### 3.1. Zadania do wykonania

W ramach ćwiczenia należy wykonać następujące pomiary:

1. Wyznaczyć rzeczywistą przekładnię układu probierczego za pomocą iskiernika kulowego.
2. Dla materiałów podanych przez prowadzącego ćwiczenie przeprowadzić pomiary napięcia przebicia, korzystając z układu elektrod przedstawionego na rys. 14.4. Pomiary przeprowadzić dla co najmniej trzech warstw badanego dielektryka. Dla każdej warstwy przeprowadzić po 5 pomiarów napięcia przebicia. Grubość każdej warstwy próbki należy zmierzyć mikrometrem, w trzech miejscach.

#### 3.2. Sposób przeprowadzenia pomiarów i układ pomiarowy

Pomiary przewidziane do wykonania w ramach ćwiczenia (pkt 3.1) należy przeprowadzić w celce wysokiego napięcia, w układzie scharakteryzowanym w ćwiczeniu nr 1. Po stronie wysokiego napięcia, za rezystorem ochronnym, należy podłączyć układ elektrod przedstawiony na rys. 14.4.

#### 3.3. Protokół wyników pomiarowych

Protokół powinien zawierać następujące dane ogólne: temat ćwiczenia, wykaz osób realizujących, datę wykonywania ćwiczenia, dane dotyczące otoczenia – ciśnienie, temperaturę i wilgotność w przypadku powietrza lub temperaturę dla oleju, dane znamionowe przyrządów wykorzystywanych w ćwiczeniu, uwagi i spostrzeżenia przydatne przy opracowywaniu sprawozdania. Ponadto protokół powinien zawierać wyniki pomiarów wartości  $U_p$  dla różnych grubości badanego dielektryka ujęte w tabeli, której wzór dla wszystkich badanych dielektryków przedstawiono poniżej. Protokół z wynikami winien być potwierdzony podpisem przez prowadzącego ćwiczenie.

**Tabela. 14.1.**

Wyniki pomiarów napięcia przebicia

Lp.	d <sub>i</sub>			d <sub>iśr</sub>	Napięcie przebicia							E <sub>p</sub>
	[mm]				U <sub>p1</sub>	U <sub>p2</sub>	U <sub>p3</sub>	U <sub>p4</sub>	U <sub>p5</sub>	U <sub>pśr</sub>	U <sub>pśr</sub>	
	1	2	3		mm	V	V	V	V	V	V	

#### 4. SPRAWOZDANIE

Z wykonywanego ćwiczenia należy przygotować sprawozdanie, jedno dla całej sekcji. Sprawozdanie powinno zawierać dane osób wykonujących ćwiczenie oraz podstawowe dane dotyczące tematu, zestawione w punkcie 3.3. Ponadto sprawozdanie powinno obejmować:

- krótki wstęp teoretyczny dotyczący ćwiczenia (nie więcej niż jedną stronę),
- dokładną charakterystykę badanych materiałów,
- tabele z wynikami przeprowadzonych pomiarów,
- wykresy zależności napięcia przebicia od grubości dielektryka  $U_p=f(a)$ .
- wykresy zależności natężenia przebicia od grubości dielektryka  $E_p=f(a)$ .

Sprawozdanie powinno zawierać analizę uzyskanych wyników i wnioski z pomiarów.

#### 5. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Wyjaśnić pojęcie wytrzymałości dielektryków stałych.
2. Wymienić czynniki mające wpływ na wytrzymałość dielektryków stałych.
3. Podać, jakie mechanizmy mogą spowodować przebicie dielektryków stałych.
4. Omówić elektryczny mechanizm przebicia dielektryków stałych.
5. Wyjaśnić cieplny mechanizm przebicia dielektryków stałych.
6. Wyjaśnić, na czym polega jonizacyjny mechanizm przebicia dielektryków stałych.
7. Jakie są przyczyny starzenia dielektryków stałych?
8. Wyjaśnić prawo Montsingera.
9. Omówić, w jaki sposób przeprowadza się badanie wytrzymałości dielektryków stałych.

**LITERATURA ZALECANA DO ĆWICZENIA:**

2, 4, 5, 7, 8, 9, 18, 21, 29.

## LITERATURA PRZEDMIOTU

- [1] BABIKOW M.A., KOMAROW N.S.: „Technika wysokich napięć”, Warszawa, 1967
- [2] „Ćwiczenia laboratoryjne z materiałoznawstwa elektrotechnicznego i techniki wysokich napięć” pod red. H. Mościckiej-Grzesiak, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002.
- [3] FLESZYŃSKI J., LISIECKI J., POHL Z.: „Miernictwo wysokonapięciowe i laboratorium wysokich napięć”. Skrypt, PWr., Wrocław 1979.
- [4] FLISOWSKI Z.: „Technika wysokich napięć”, WNT Warszawa, wyd. III, 1995.
- [5] FLORKOWSKA B.: „Podstawy metod badań układów izolacyjnych wysokiego napięcia”. Wyd. AGH, Skrypt nr 1245, Kraków 1991.
- [6] FLORKOWSKA B.: „Technika wysokich napięć”, Wyd. AGH, skrypt nr 1294, Kraków 1991.
- [7] GLORKOWSKA B.: „Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia”, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2003.
- [8] GACEK Z.: „Technika wysokich napięć”, PŚI. w Gliwicach, skrypt nr 1456, Gliwice 1989.
- [9] GACEK Z.: „Wysokonapięciowa technika izolacyjna”. Podręcznik akademicki, Wyd. PŚI. w Gliwicach, 1996.
- [10] HYCNAR J.: „Oleje izolacyjne w eksploatacji”. WNT, Warszawa, 1968.
- [11] „Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce”. Praca zbiorowa pod red. H. Mościckiej-Grzesiak, tom I, Wyd. PP 1996.
- [12] „Izolatory Elektroenergetyczne”; Katalog Zakładów Porcelany Elektrotechnicznej, „Zapel” SA, Boguchwała, 1996.
- [13] JUCHNIEWICZ J., LISIECKI J.: „Wysokonapięciowe układy izolacyjne”. Skrypt, PWr., Wrocław 1980.
- [14] KĘDZIA J.: „Badania elektryzacji statycznej mineralnych olejów izolacyjnych”. ZN WSI Opole, nr 28, Opole 1988.
- [15] KĘDZIA J., KUCHARSKA B., SKUBIS J.: „Laboratorium techniki wysokich napięć”, Politechnika Opolska, Opole, skrypt nr 205, 1998.
- [16] KRAWCZYŃSKI R., LIDMANOWSKI W., ROGUSKI Z., STAŃCZAK B.: „Laboratorium wysokich napięć”, Wyd. PW, Warszawa 1993.
- [17] „Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce” pod red. J. Fleszyńskiego, OW Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [18] LIMANOWSKI W.: „Zarys teorii wyładowań w dielektrykach”, W N, Warszawa 1988.
- [19] MOSIŃSKI F.: „Metody statystyczne w technice wysokich napięć”. Skrypt PŁ, Łódź, 1995.
- [20] POHL Z.: „Izolatory elektroenergetyczne”. Oficyna Wyd. PWr, Wrocław 1995.

- [21] PN-IEC 243-1 „Metody badania wytrzymałości elektrycznej materiałów elektroizolacyjnych. Badania przy częstotliwości sieciowej”
- [22] Praca zbiorowa: „Układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych”. WNT, Warszawa 1978.
- [23] Praca zbiorowa: „Technika badań wysokonapięciowych”. T. 1 i 2, WNT, Warszawa 1985.
- [24] RANACHOWSKI J.: „Elektroceramika”. T. 1 i 2, PWN, Warszawa - Poznań 1982.
- [25] SKUBIS J.: „Charakterystyka metody chromatografii gazowej stosowanej do badania transformatorów”. ZN WSI Opole, nr 120, Elektryka nr 25, Opole 1986.
- [26] SKUBIS J.: „Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych”, IPPT-PAN, Warszawa 1994.
- [27] SKUBIS J.: „Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej”, Opole: Of. Wyd. PO, 1998.
- [28] SULIMA T.: „Materiały i układy izolacyjne”. Wyd. PWR, Wrocław 1987.
- [29] SZCZEPAŃSKI Z.: „Wyładowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych”. WNT, Warszawa 1973.
- [30] SZCZEPAŃSKI Z.: „Wytrzymałość dielektryczna”. Skrypt, PŁ, 1986
- [31] SZPOR S., DZIERŻEK H., WINIARSKI W.: „Technika wysokich napięć”. WNT, wyd. III, Warszawa 1978.
- [32] WIRA A., ZYBERT R.: „Laboratorium techniki wysokich napięć”. Skrypt, PŁ, Łódź 1982.
- [33] WŁODEK R., NOWAK W.: „Metody statystyczne z przykładami zastosowań w technice wysokich napięć”. Skrypt AGH, nr 1288, Kraków 1991.
- [34] WŁODEK R., PROCHOWNIK A.: „Obliczanie pól elektrycznych w układach elektroizolacyjnych”. Skrypt AGH, nr 1297, wyd. II, Kraków 1992.
- [35] WODZIŃSKI J.: „Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów”. PWN, Warszawa 1997.
- [36] WIRA A., ZYBERT R.: „Laboratorium z inżynierii wysokonapięciowej”. Skrypt, PŁ, Łódź 2003.