

LABORATORIUM

TECHNIKA WYSOKICH NAPIĘĆ

Ćwiczenie nr 7

Badanie wytrzymałości powietrza przy napięciu przemiennym dla różnych układów elektrod

Lublin 2026 r.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się ze zjawiskiem wyładowań niezupełnych (ulotu) oraz badanie wytrzymałości elektrycznej powietrza przy napięciu przemiennym 50 Hz dla różnych układów elektrod. W ramach ćwiczenia wyznaczane są wartości napięcia ulotu i przeskoku w funkcji odległości między elektrodami, a następnie porównywane są wyniki uzyskane dla badanych układów elektrod.

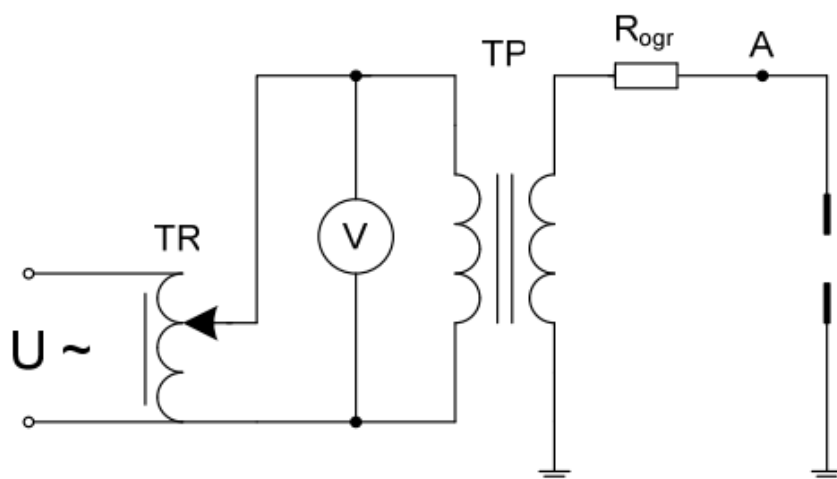
Zakres ćwiczenia

Zakres ćwiczenia obejmuje badanie wytrzymałości elektrycznej powietrza przy napięciu przemiennym 50 Hz dla różnych układów elektrod. Pomiary zostaną wykonane dla układu elektrod pręt–pręt o średnicach 8 mm i 13 mm oraz dla układu walców współosiowych, przy różnych odległościach między elektrodami. Dla każdej odległości zostaną wykonane trzy pomiary napięcia ulotu i przeskoku, a następnie wyznaczone zostaną wartości średnie oraz wartości napięć przeliczone na warunki normalne. Na podstawie uzyskanych wyników zostaną sporządzone charakterystyki zależności napięcia ulotu i przeskoku od odległości między elektrodami.

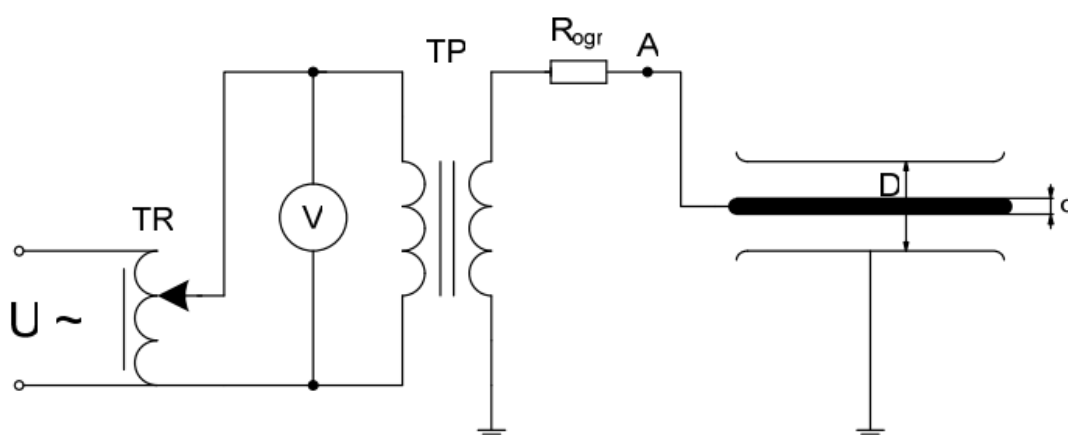
Stanowisko pomiarowe

Do wykonania ćwiczenia wykorzystano stanowisko laboratoryjne umożliwiające badanie wytrzymałości elektrycznej powietrza przy napięciu przemiennym 50 Hz dla różnych układów elektrod. Układ zasilany jest z autotransformatora, który umożliwia płynną regulację napięcia podawanego na transformator probierczy. Transformator probierczy podwyższa napięcie do wartości wysokiego napięcia wykorzystywanego podczas badań.

W zależności od wykonywanej części ćwiczenia do wyjścia transformatora probierczego dołączany jest układ elektrod pręt–pręt lub układ walców współosiowych. W układzie pręt–pręt stosowane są elektrody o średnicy 8 mm i 13 mm, natomiast w układzie walców współosiowych zmieniana jest średnica elektrody wewnętrznej przy stałej średnicy elektrody zewnętrznej. Schematy układów pomiarowych przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rysunek 1. Schemat układu pomiarowego – elektrody pręt–prętowego



Rysunek 2. Schemat układu pomiarowego – elektrody walce współosiowe

Oznaczenia do rysunków 1 oraz 2:

$U\sim$ – napięcie zasilające przemienne 50 Hz,

TR – autotransformator regulacyjny,

TP – transformator probierczy,

V – woltomierz po stronie niskiego napięcia transformatora probierczego,

R_{ogr} – rezystor ograniczający,

A – zacisk wyjściowy wysokiego napięcia transformatora probierczego,

d – średnica wewnętrznej elektrody (walec wewnętrzny),

D – średnica zewnętrznej elektrody

Wykaz urządzeń i aparatury

- stanowisko laboratoryjne do pomiaru wysokich napięć,
- autotransformator regulacyjny,
- transformator probierczy 60 kV / 220 V,
- elektrody prętowe o średnicy 8 mm oraz 13 mm,
- elektrody wewnętrzne o różnej średnicy,
- elektroda zewnętrzna o stałej średnicy,
- rezystor ograniczający,
- woltomierz.

Wykonanie ćwiczenia

1. Przygotowanie stanowiska

- Zapoznać się ze stanowiskiem laboratoryjnym oraz schematami układów pomiarowych przedstawionymi na rysunkach 1–2.
- Sprawdzić, czy stanowisko jest przygotowane do pomiaru w układzie elektrod pręt–pręt zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.
- Odczytać warunki atmosferyczne panujące w sali laboratoryjnej i zapisać w tabeli 1.

Tabela 1. Warunki atmosferyczne

Temperatura otoczenia t	 °C
Ciśnienie atmosferyczne b	 hPa
Wilgotność względna powietrza φ	 %

2. Pomiar w układzie pręt–pręt elektrod o średnicy 8mm

1. Otworzyć komorę wysokiego napięcia.
2. Założyć drążek uziemiający na iskiernik po stronie wysokiego napięcia.
3. Zamontować elektrody prętowe o średnicy 8mm.
4. Ustawić odległość między elektrodami na odległość 1cm.
5. Zdjąć drążek uziemiający z zacisku wysokiego napięcia.

6. Zamknąć komorę wysokiego napięcia.
7. Załączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.
8. Sprawdzić, czy regulator autotransformatora znajduje się w położeniu zerowym.
9. Załączyć obwód wysokiego napięcia.
10. Powoli zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora, odczytując napięcie kolejnych zjawisk: ulotu oraz przeskoku. **UWAGA: Podczas regulacji trzymać rękę na wyłączniku obwodu wysokiego napięcia, aby po wystąpieniu przeskoku iskry natychmiast wyłączyć obwód.**
11. Wartości napięć zanotować w tabeli 2.
12. Po wystąpieniu przeskoku ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym.
13. Czynności opisane w punktach 8–11 powtórzyć trzykrotnie dla tej samej odległości między elektrodami.
14. Po uzyskaniu trzech pomiarów, ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym.
15. Wyłączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.
16. Powtórzyć czynności opisane w punktach 1–15 dla kolejnych odległości między elektrodami, zwiększając odległość każdorazowo o 1 cm, aż do osiągnięcia odległości 6 cm zgodnie z tabelą 2.
17. Po zakończeniu pomiarów ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym oraz wyłączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.

Tabela 2. Pomiar napięcia ulotu u_o i przeskoku u_p dla układu z elektrodami prętowymi o średnicy $\varphi = 8\text{ mm}$

L.p.	a	ϑ	u_o	u_p
	cm	-	V	V
1	1	60 kV / 220 V		
2				
3				
4	2			
5				
6				

7	3		
8			
9			
10	4		
11			
12			
13	5		
14			
15			
16	6		
17			
18			

3. Pomiar w układzie pręt–pręt elektrod o średnicy 13mm

- Otworzyć komorę wysokiego napięcia.
- Założyć drążek uziemiający na iskiernik po stronie wysokiego napięcia.
- Zamontować elektrody prętowe o średnicy 13 mm.
- Ustawić odległość między elektrodami na odległość 1cm.
- Zdjąć drążek uziemiający z zacisku wysokiego napięcia.
- Zamknąć komorę wysokiego napięcia.
- Załączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.
- Sprawdzić, czy regulator autotransformatora znajduje się w położeniu zerowym.
- Załączyć obwód wysokiego napięcia.
- Powoli zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora, odczytując napięcie kolejnych zjawisk: ulotu oraz przeskoku. **UWAGA: Podczas regulacji trzymać rękę na wyłączniku obwodu wysokiego napięcia, aby po wystąpieniu przeskoku iskry natychmiast wyłączyć obwód.**
- Wartości napięć zanotować w tabeli 3.
- Po wystąpieniu przeskoku ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym.
- Czynności opisane w punktach 8–12 powtórzyć trzykrotnie dla tej samej

odległości między elektrodami.

14. Po uzyskaniu trzech pomiarów, ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym.
15. Wyłączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.
16. Powtórzyć czynności opisane w punktach 1–15 dla kolejnych odległości między elektrodami, zwiększając odległość każdorazowo o 1 cm, aż do osiągnięcia odległości 6 cm zgodnie z tabelą 3.
17. Po zakończeniu pomiarów ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym oraz wyłączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.

Tabela 3. Pomiar napięcia ulotu u_o i przeskoku u_p dla układu z elektrodami prętowymi o średnicy $\varphi = 13\text{mm}$

L.p.	a	ϑ	u	u_p
	cm	-	V	V
1	1	60 kV / 220 V		
2				
3				
4	2			
5				
6				
7	3			
8				
9				
10	4			
11				
12				
13	5			
14				
15				
16	6			
17				
18				

4. Pomiar w układzie walców współosiowych

1. Otworzyć komorę wysokiego napięcia.
2. Założyć drążek uziemiający na zacisk wysokiego napięcia.
3. Podłączyć układ walców współosiowych używając jako pierwszej elektrodę o średnicy 2mm.
4. Zdjąć drążek uziemiający z zacisku wysokiego napięcia.
5. Zamknąć komorę wysokiego napięcia.
6. Załączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.
7. Sprawdzić, czy regulator autotransformatora znajduje się w położeniu zerowym.
8. Załączyć obwód wysokiego napięcia.
9. Powoli zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora, odczytując napięcie kolejnych zjawisk: ulotu oraz przeskoku. **UWAGA: Podczas regulacji trzymać rękę na wyłączniku obwodu wysokiego napięcia, aby po wystąpieniu przeskoku iskry natychmiast wyłączyć obwód.**
10. Wartości napięć zanotować w tabeli 4.
11. Po wystąpieniu przeskoku ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym.
12. Czynności opisane w punktach 7–11 powtórzyć trzykrotnie dla tej samej odległości między elektrodami.
13. Po uzyskaniu trzech pomiarów, ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym.
14. Wyłączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.
15. Powtórzyć czynności opisane w punktach 1–14 dla kolejnych średnic elektrod zgodnie z tabelą 4.
16. Po zakończeniu pomiarów ustawić regulator autotransformatora w położeniu zerowym oraz wyłączyć zasilanie stanowiska pomiarowego.

Tabela 4. Pomiar napięcia ulotu u_o i przeskoku u_p dla układu z walców współosiowych

L.p.	D	d	ϑ	u_o	u_p
	mm	mm	-	V	V
1	75	2	60 kV / 220 V		
2					
3					
4		3			
5					
6					
7		5			
8					
9					
10		8			
11					
12					
13		12			
14					
15					
16		20			
17					
18					
19		25			
20					
21					
22		35			
23					
24					
25		50			
26					
27					

3. Opracowanie wyników

1. Wyznaczenie średnich wartości napięcia ulotu i przeskoku

Na podstawie trzech kolejnych pomiarów dla każdej odległości między elektrodami wyznaczyć średnie wartości napięcia ulotu i przeskoku:

$$\begin{aligned} u_{ośr} &= \frac{u_{o1} + u_{o2} + u_{o3}}{3} \\ u_{pśr} &= \frac{u_{p1} + u_{p2} + u_{p3}}{3} \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

u_{o1}, u_{o2}, u_{o3} – kolejne wartości napięcia ulotu odczytane z woltomierza,

u_{p1}, u_{p2}, u_{p3} – kolejne wartości napięcia przeskoku odczytane z woltomierza,

2. Wyznaczenie wartości napięcia ulotu i przeskoku

Na podstawie wyznaczonych średnich wartości napięcia oraz przekładni transformatora probierczego obliczyć wartości napięcia ulotu i przeskoku:

$$\begin{aligned} U_0 &= 2 \cdot u_{ośr} \cdot \vartheta \\ U_p &= 2 \cdot u_{pśr} \cdot \vartheta \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

ϑ – przekładnia transformatora probierczego

3. Wyznaczenie wartości napięcia ulotu i przeskoku w warunkach normalnych

W celu uwzględnienia warunków atmosferycznych wyznaczyć względną gęstość powietrza:

$$\delta = \frac{b}{1013} \cdot \frac{293}{273 + t} = 0,289 \frac{b}{273 + t} \quad (3)$$

gdzie:

b – ciśnienie atmosferyczne,

t – temperatura powietrza.

Następnie wyznaczyć wartości napięcia ulotu i przeskoku przeliczone na warunki normalne:

$$U_{on} = \frac{U_o}{k_w \cdot \delta}$$

$$U_{pn} = \frac{U_p}{k_w \cdot \delta} \quad (4)$$

Współczynnik k_w odczytać wykresu (załącznik 2) na podstawie wilgotności bezwzględnej powietrza w , [g/cm³].

Wilgotność bezwzględną powietrza obliczyć z zależności:

$$w = \varphi \cdot w_n \quad (5)$$

gdzie:

w_n – wilgotność bezwzględna powietrza w stanie nasycenia odczytana z tablic (załącznik 1) dla danej temperatury,

φ – wilgotność powietrza odczytana z higrometru.

4. Wyznaczenie obliczeniowej wartości napięcia przeskoku

Obliczeniową wartość napięcia przeskoku wyznaczyć z zależności:

$$U'_{pn} = 14 + 3,16 \cdot a \quad (6)$$

gdzie:

a – odległość między elektrodami.

Tabela wyników obliczeń

Tabela 5. Wyniki obliczeń dla napięcia ulotu u_o i przeskoku u_p dla układu z elektrodami prętowymi o średnicy $\varphi = 8\text{mm}$ oraz $\varphi = 13\text{mm}$

L.p.	a	ϑ	u_o	$u_{o\text{śr}}$	U_o	U_{on}	u_p	$u_{p\text{śr}}$	U_p	U_{pn}
	mm	-	V	V	kV	kV	V	V	kV	kV
1	1	60 kV / 220 V								
2										
3										
4	2									
5										
6										
7	3									
8										
9										
10	4									
11										
12										
13	5									
14										
15										
16	6									
17										
18										

Tabela 6. Wyniki obliczeń dla pomiaru napięcia ulotu u_o i przeskoku u_p dla układu z walców współosiowych

L.p.	D	d	θ	u_o	$u_{ośr}$	U_o	U_{on}	u_p	$u_{pśr}$	U_p	U_{pn}	
	mm	mm	-	V	V	kV	kV	V	V	kV	kV	
1	75	2	60 kV / 220 V									
2												
3												
4		3										
5												
6												
7		5										
8												
9												
10		8										
11												
12												
13		12										
14												
15												
16		20										
17												
18												
19		25										
20												
21												
22		35										
23												
24												
25		50										
26												
27												

Wykonanie sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- stronę tytułową;
- schematy układów pomiarowych;
- tabele wyników pomiarów;
- tabelę wyników obliczeń;
- przykładowe obliczenia;
- wykresy zależności:
 - $U_{on}=f(a)$, $U_{pn}=f(a)$, dla układu pręt-pręt o średnicy 8 mm;
 - $U_{on}=f(a)$, $U_{pn}=f(a)$, dla układu pręt-pręt o średnicy 13 mm;
 - $U_{on}=f(a)$, $U_{pn}=f(a)$, dla układów pręt-pręt o średnicy 8 mm oraz 13 mm na wspólnym wykresie;
 - $U_{on}=f(a)$, $U_{pn}=f(a)$, dla układów walców współosiowych;
- analizę otrzymanych wyników oraz wnioski.

Załącznik 1. Wilgotność bezwzględna powietrza w stanie nasycenia w_n w zależności od temperatury t

$$w_n = f(t)$$

Temperatura t	Wilgotność bezwzględna w stanie nasycenia w_n
[°C]	[g/m³]
11	10
12	10,7
13	11,4
14	12,1
15	12,8
16	13,6
17	14,5
18	15,4
19	16,3
20	17,3
21	18,3
22	19,4
23	20,6
24	21,8
25	23
26	24,4
27	25,8
28	27,2
29	28,7
30	30,2
31	32
32	33,8
33	35,6
34	37,5

Załącznik 2. Zależność współczynnika poprawkowego k_w od wilgotności bezwzględnej powietrza w

