

Instytut Energetyki
– Państwowy Instytut Badawczy

Badanie bezpieczeństwa operatorów urządzeń gaśniczych, narażonych na porażenie prądem elektrycznym w trakcie gaszenia pożarów urządzeń znajdujących się pod napięciem

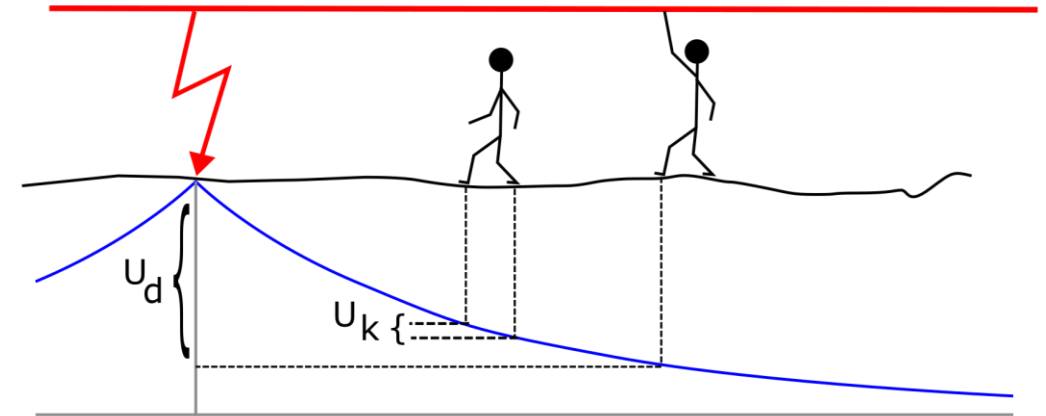


Charakterystyka zagrożeń

Zagrożenie wynikające z uszkodzeń części czynnych urządzeń energetycznych

Napięcie dotykowe U_d (skuteczne) - napięcie między częściami przewodzącymi przy jednoczesnym dotknięciu przez człowieka lub zwierzę [IEV 195-05-11]

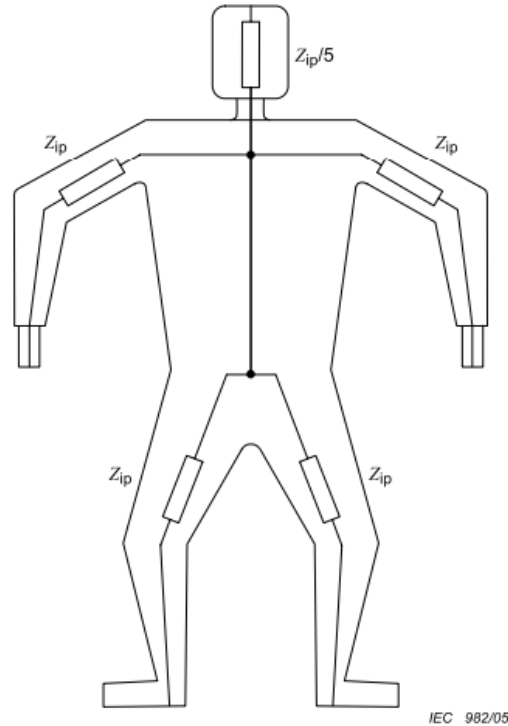
Napięcie krokowe U_k - napięcie między dwoma punktami na powierzchni ziemi [IEV 195-05-12]



Graficzna prezentacja U_d i U_k

Charakterystyka zagrożeń

Podział ciała ludzkiego na impedancje



Wewnętrzna impedancja częściowa Z_{ip}

Impedancja wnętrza ciała człowieka Z_i - impedancja między dwiema częściami przewodzącymi stykającymi się z dwiema częściami ciała człowieka, z pominięciem impedancji skóry

Impedancja skóry Z_s - impedancja między częścią przewodzącą na skórze a tkanką przewodzącą pod nią

Impedancja całkowita Z_t - suma impedancji wewnętrznej i impedancji skóry

Charakterystyka zagrożeń

Wyprowadzenie natężenia prądu płynącego przez człowieka

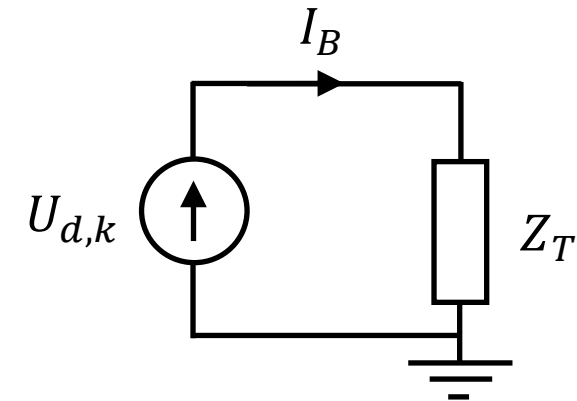
Z prawa Ohma można obliczyć natężenie prądu I_B , które przepływa przez ciało. Zasadniczo wielkość ta jest tym co zagraża zdrowiu człowieka.

Na potrzeby przybliżenia natury zjawiska można wyprowadzić następującą analogię:

- Napięcie dotykowe/krokowe określa jak chętnie przepłynie natężenie prądu przez ciało,
- Impedancja całkowita stanowi „hamulec” dla przepływających elektronów,
- Natężenie prądu to ile elektronów przepłynie przez nas i jak bardzo może uszkodzić nasze tkanki.

$$I_B = \frac{U_{d,k}}{Z_T}$$

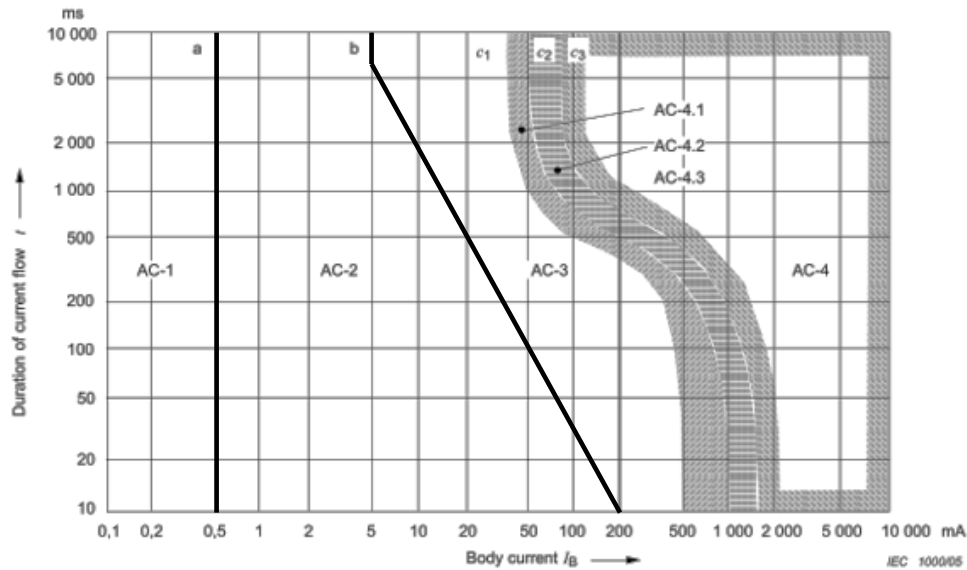
Równanie z prawa Ohma, gdzie: $U_{d,k}$ - napięcie krokowe/ dotykowe, I_B - prąd płynący przez ciało człowieka, Z_T - impedancja całkowita



Schemat zastępczy obwodu przy wystąpieniu napięcia dotykowego/krokowego,

Charakterystyka zagrożeń

Strefy czasowo-prądowe oraz skutki fizjologiczne oddziaływania prądu przemiennego



Konwencjonalne strefy czasowo-prądowe wpływu prądu przemiennego (15 Hz do 100 Hz) na osoby dla ścieżki prądu odpowiadającej lewej ręce i stopom [IEC TS 60479-1:2005 + AMD : 2016]

Strefa	Granice	Skutki fizjologiczne
AC-1	Do 0,5 mA – krzywa a	Odczuwanie możliwe, ale zazwyczaj bez reakcji „szarpnięcia”
AC-2	Od 0,5 mA do krzywej b	Odczuwanie i mimowolne skurcze mięśni są prawdopodobne, ale zazwyczaj brak szkodliwych skutków fizjologicznych.
AC-3	Od krzywej b i powyżej	Silne mimowolne skurcze mięśni. Trudności w oddychaniu. Odwracalne zaburzenia pracy serca. Może wystąpić unieruchomienie. Skutki nasilają się wraz z prądem. Zwykle nie przewiduje się trwałych uszkodzeń organizmu.
AC-4	Powyżej krzywej c ₁	Mogą wystąpić efekty patofizjologiczne, takie jak zatrzymanie akcji serca, zatrzymanie oddechu, oparzenia lub inne uszkodzenia komórkowe. Prawdopodobieństwo migotania komór rośnie wraz z natężeniem prądu i czasem.
	c ₁ – c ₂	AC-4.1 – prawdopodobieństwo migotania komór do ok. 5%
	c ₂ – c ₃	AC-4.2 – prawdopodobieństwo migotania komór do ok. 50%
	Powyżej krzywej c ₃	AC-4.3 – prawdopodobieństwo migotania komór powyżej 50%

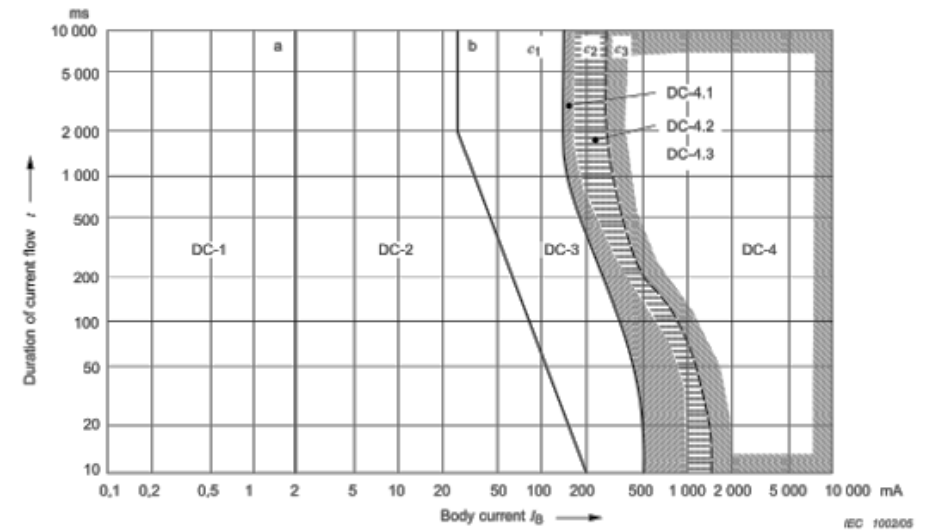
Strefy czasowo-prądowe dla a. c. 15 Hz do 100 Hz dla ścieżki ręka-stopa [IEC TS 60479-1:2005 + AMD : 2016]

Charakterystyka zagrożeń

Strefy czasowo-prądowe oraz skutki fizjologiczne oddziaływania prądu stałego

Strefa	Granice	Skutki fizjologiczne
DC-1	Do 2 mA – krzywa a	Odczuwanie możliwe, ale zazwyczaj bez reakcji „szarpnięcia”
DC-2	Od 2 mA do krzywej b	Odczuwanie i mimowolne skurcze mięśni są prawdopodobne, ale zazwyczaj brak szkodliwych skutków fizjologicznych.
DC-3	Od krzywej b i powyżej	Silne mimowolne skurcze mięśni. Trudności w oddychaniu. Odwracalne zaburzenia pracy serca. Może wystąpić unieruchomienie. Skutki nasilają się wraz z prądem. Zwykle nie przewiduje się trwałych uszkodzeń organizmu.
DC-4	Powyżej krzywej c ₁	Mogą wystąpić efekty patofizjologiczne, takie jak zatrzymanie akcji serca, zatrzymanie oddechu, oparzenia lub inne uszkodzenia komórkowe. Prawdopodobieństwo migotania komór rośnie wraz z natężeniem prądu i czasem przepływu.
	c ₁ – c ₂	DC-4.1 – prawdopodobieństwo migotania komór do ok. 5%
	c ₂ – c ₃	DC-4.2 – prawdopodobieństwo migotania komór do ok. 50%
	Powyżej krzywej c ₃	DC-4.3 – prawdopodobieństwo migotania komór powyżej 50%

Strefy czasowo-prądowe dla a. c. 15 Hz do 100 Hz dla ścieżki ręka-stopą
[IEC TS 60479-1:2005 + AMD : 2016]



Konwencjonalne strefy czasowo-prądowe wpływu prądu stałego na ludzi
[IEC TS 60479-1:2005 + AMD : 2016]

Charakterystyka zagrożeń

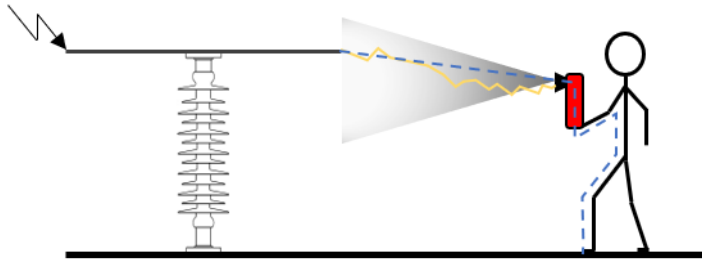
Na podstawie obliczonego prądu można wyróżnić próg samouwolnienia. Jest to maksymalna wartość prądu dotykowego, przy którym osoba trzymająca części czynne pod napięciem może je wypuścić.

Dla prądu stałego w przeciwieństwie do prądu przemiennego, nie ma jednoznacznie określonego progu. Jedynie załączanie i wyłączenie prądu prowadzi do bolesnych skurczów mięśni powodujących niemożliwość uwolnienia się.

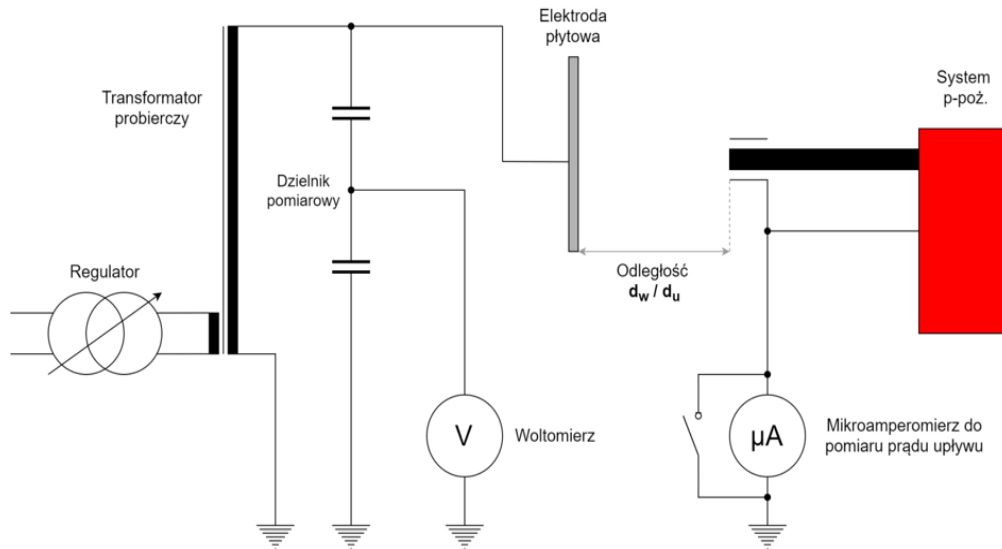
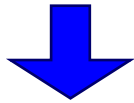
Dla prądu przemiennego dla dorosłego mężczyzny przyjmuje się wartość 10 mA

Badania laboratoryjne

Pomiary prądu upływu w trakcie aplikacji środka gaśniczego



Ścieżka przepływu prądu upływu w trakcie bezpośredniego porażenia prądem elektrycznym



Schemat układu probierczego wykorzystywanego w trakcie badań urządzeń gaśniczych



Urządzenia gaśnicze w trakcie pomiarów



Hala Najwyższych Napięć



Proszkowy agregat gaśniczy podczas badań wytrzymałości na przebicie

Badania laboratoryjne

Pomiary prądu upływu w trakcie aplikacji środka gaśniczego



Prądy upływu dla wszystkich badanych gaśnic (CO₂, wodne, pianowe, mgłowe) były znacząco poniżej poziomów niebezpiecznych dla człowieka.



Gaśnice wodne i pianowe mogą być bezpieczne w określonych warunkach, ale wymagają dalszych analiz.



Prądy AC były nieco wyższe niż DC – prawdopodobnie z powodu prądów pojemnościowych.



Wartości prądu upływu dla prądownic wodnych były poniżej progu mierzalności, niezależnie od napięcia, typu strumienia i przewodności wody.



Skuteczne uziemienie pompy wodnej w przypadku prądownic wodnych było kluczowe dla ograniczenia prądów upływu.



Wyniki wskazują na potencjalne bezpieczeństwo stosowania prądownic pod napięciem, ale nie stanowią jednoznacznego potwierdzenia – potrzebne są dalsze badania.

TABELA I. Wyniki pomiaru prądu upływu dla prądownic strażackich

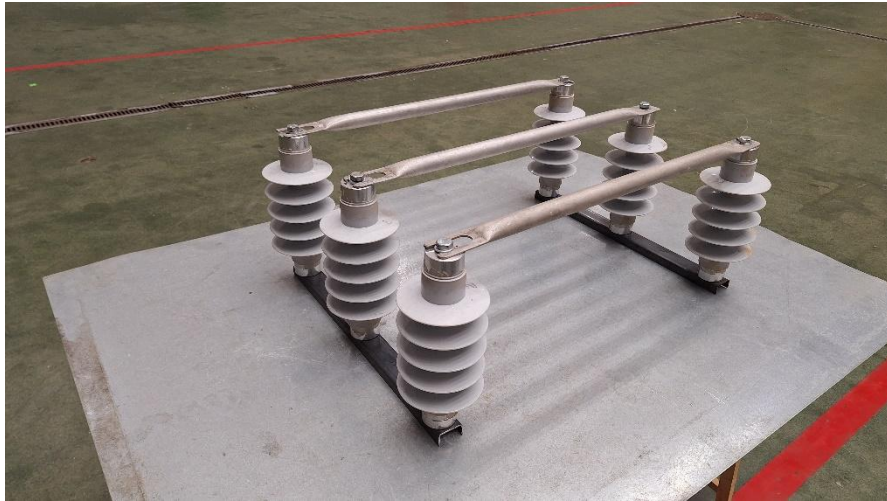
Rodzaj prądownicy	σ [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	U_{AC} [kV_{RMS}]		U_{DC} [kV_{mean}]	
		35 [μA]	50 [μA]	35 [μA]	50 [μA]
ST-2600	5	< 100	< 100	< 130	< 130
	100	< 100	< 100	< 130	< 130
	2500	< 100	< 100	< 130	< 130
Flush Protek style #303	5	< 100	< 100	< 130	< 130
	100	< 100	< 100	< 130	< 130
	2500	< 100	< 100	< 130	< 130

TABELA II. Wyniki pomiaru prądu upływu dla zbadanych typów gaśnic (w tabeli podano wartości średnie dla danego typu środka gaśniczego)

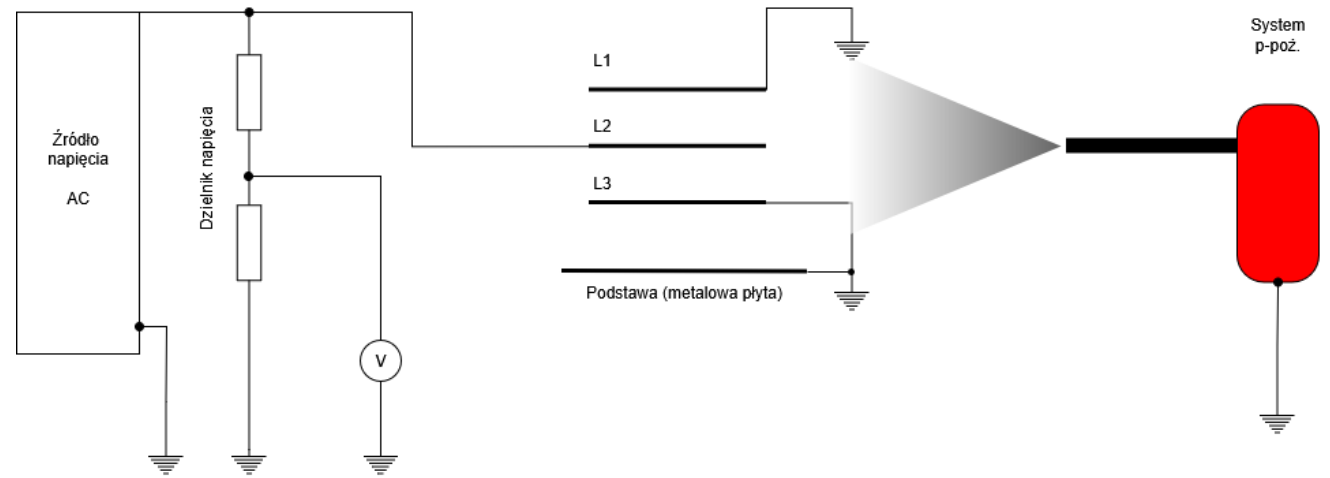
Rodzaj prądownicy	U_{AC} [kV_{RMS}]		U_{DC} [kV_{mean}]	
	35 [μA]	50 [μA]	35 [μA]	50 [μA]
Gaśnica CO ₂	145	222	121	178
Gaśnica pianowa	168	255	154	242
Gaśnica wodna	173	265	161	249

Badania laboratoryjne

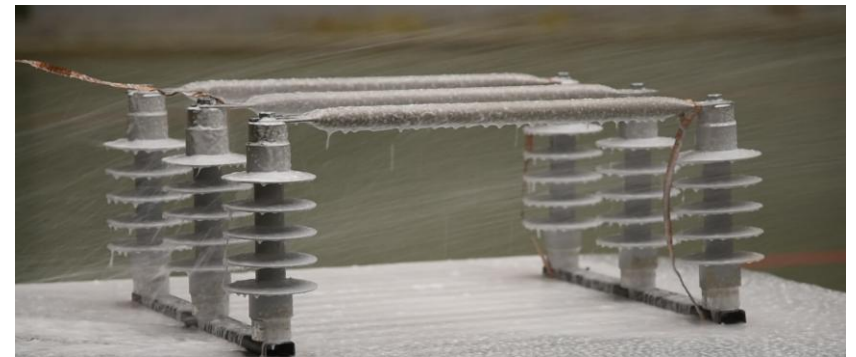
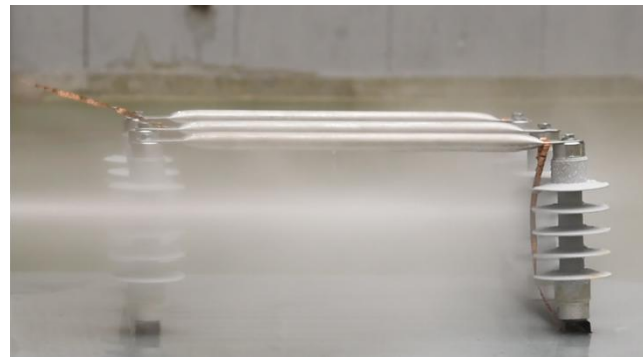
Wpływ środka gaśniczego na wytrzymałość elektryczną układów izolacyjnych



Model trójfazowej instalacji elektrycznej 24 kV



Badania wpływu środka gaśniczego na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego – układ probierczy



Model podczas badań laboratoryjnych – aplikacja środków gaśniczych bezpośrednio na elementy znajdujących się pod napięciem

Badania laboratoryjne

Wpływ środka gaśniczego na wytrzymałość elektryczną układów izolacyjnych

Wyniki pomiaru napięcia przeskoku dla dysz wodnych

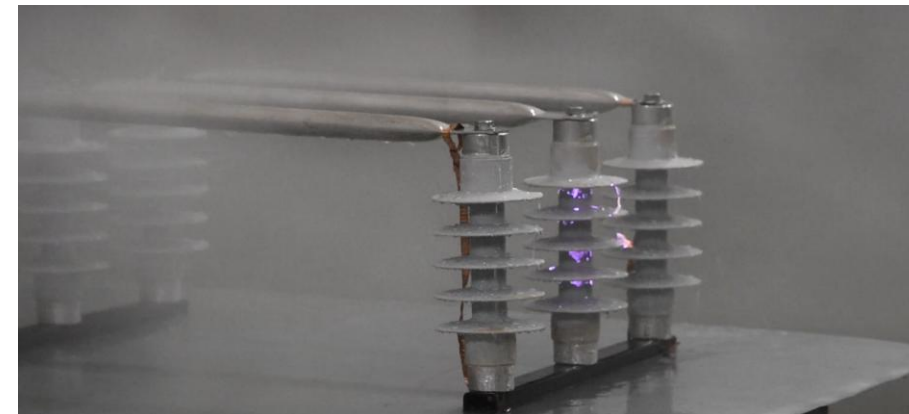
Typ dyszy	Rodzaj strumienia	U [kV]					
		24	30	35	40	42,5	45
ST-2600	wąski	o	o	o	o	o	x (15s)
ST-2600	szeroki	o	o	o	o	o	x (27s)
Flush Protek style #303	wąski	o	o	o	x (16s)	-	-
Flush Protek style #303	szeroki	o ⁽¹⁾	x (25s)	-	-	-	-

⁽¹⁾ widoczne wyładowania ślizgowe na powierzchni izolatorów

o – brak wyładowania

x – wyładowanie

(... s) – czas do wystąpienia wyładowania



Wyładowania ślizgowe zainicjowane na skutek podania środka gaśniczego (U = 24 kV)

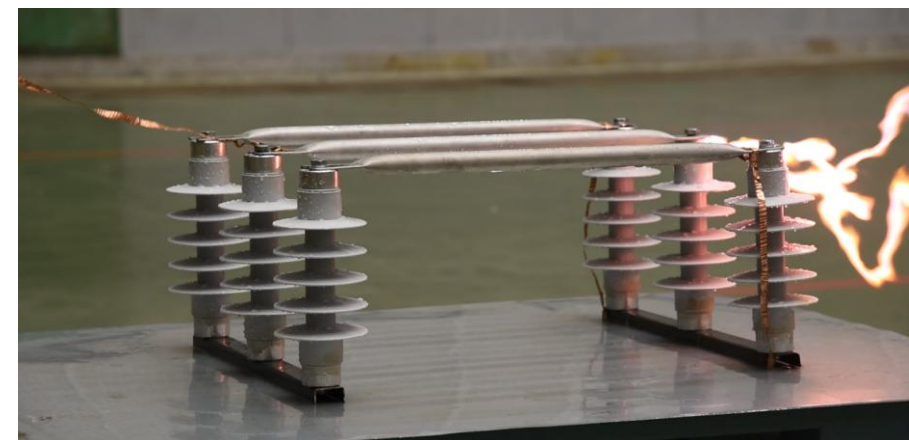
Wyniki badań dla przenośnych urządzeń gaśniczych

Rodzaj środka gaśniczego	Typ *	24 kV	50 kV
Piana gaśnicza	#1	o	x
	#2	x	x
	#3	o	x
	#4	o	x
Mgła wodna	#1	o	x
Dwutlenek węgla (CO ₂)	#1	o	x
	#2	o	x

* Do badań wykorzystano przenośne urządzenia gaśnicze różnych producentów, przy czym nazwy handlowe nie są podawane w celu zachowania neutralności wyników.

o – brak wyładowania

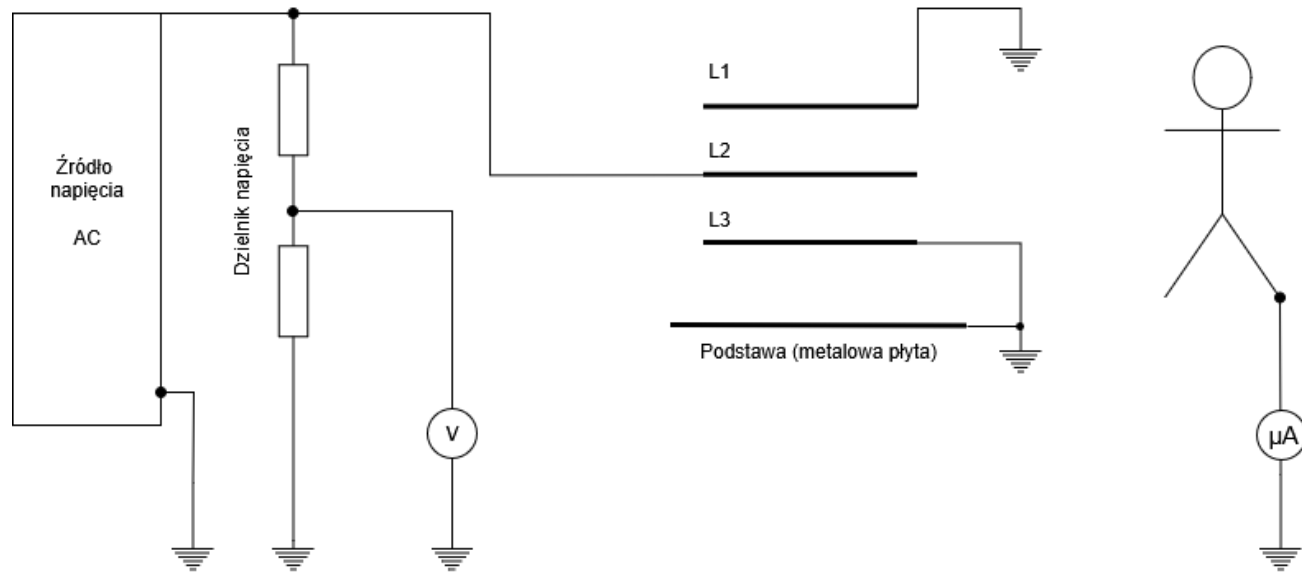
x – wyładowanie



Przykłady inicjacji wyładowania – dysza wodna

Badania laboratoryjne

Badania oddziaływania pola elektrycznego na człowieka



Badania oddziaływania pola elektrycznego na człowieka – układ probierczy



Pomiar prądu upływu

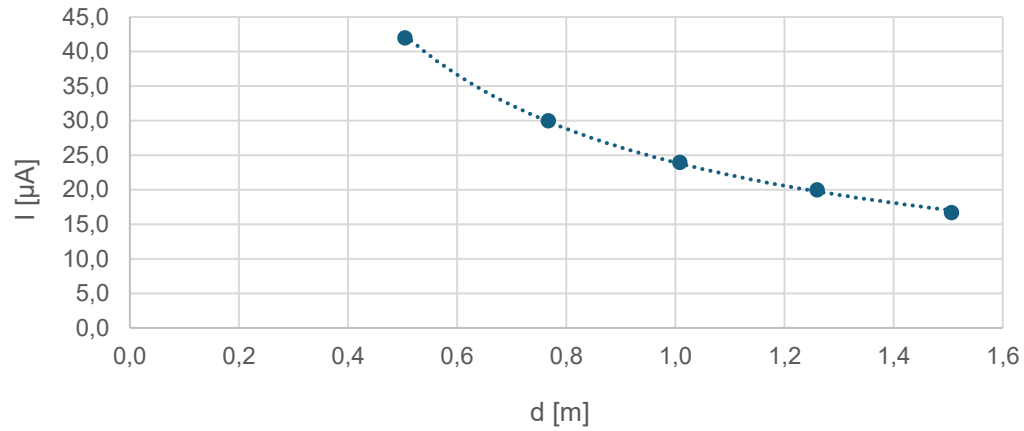


Pomiar napięć krokowych

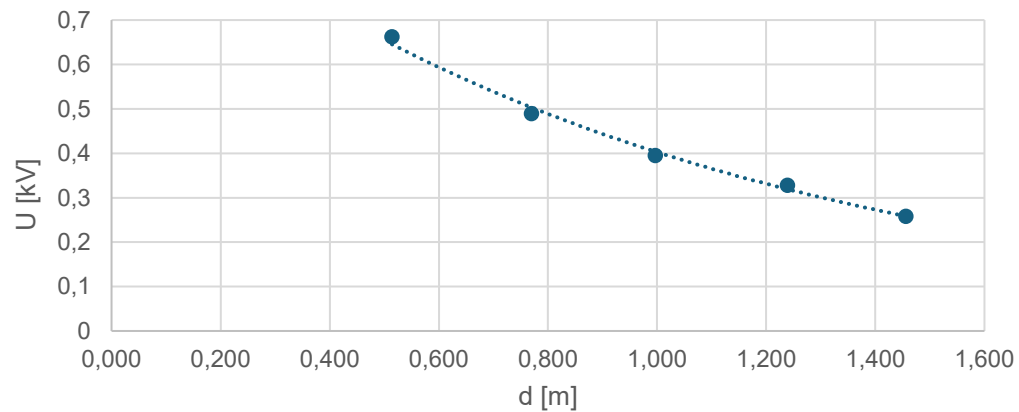
Badania laboratoryjne

Badania oddziaływania pola elektrycznego na człowieka

Wyniki pomiaru prądu upływu



Wyniki pomiaru napięcia krokowego



Manekin ubrany w przewodzący strój i ustawiony w strefie oddziaływania pola elektrycznego

Wnioski i zalecenia

Zalecenia bezpieczeństwa przy gaszeniu urządzeń pod napięciem (SN / WN, AC / DC)

- ▶ **Zachowanie minimalnych odległości bezpiecznych** od urządzeń pod napięciem, z uwzględnieniem napięć krokowych, prądów upływu oraz zwarć doziemnych; stosowanie tabel odległości zależnych od poziomu napięcia
- ▶ **Dobór środków gaśniczych o potwierdzonych właściwościach dielektrycznych**, szczególnie dla instalacji AC i DC > 1 kV, potwierdzonych badaniami laboratoryjnymi
- ▶ **Ograniczanie ciągłych, gęstych strug gaśniczych** o wysokiej przewodności; preferowanie środków o mniejszej intensywności rozpylania i niższej konduktywności
- ▶ **Uziemianie pomp i systemów wodnych** – istotna redukcja prądów upływu przepływających przez operatora (potwierdzona badaniami)
- ▶ **Szkolenia operatorów** w zakresie:
 - właściwości elektrycznych środków gaśniczych (CO₂, piana, woda),
 - rozpoznawania inicjacji wyładowań powierzchniowych jako sygnału przerwania gaszenia
- ▶ **Rozwój i ujednoczenie norm** dla gaszenia instalacji WN i DC (OZE, PV, magazyny energii)
- ▶ **Kontynuacja badań** nad wpływem środków gaśniczych na wytrzymałość elektryczną izolacji w warunkach rzeczywistych (modele pełnoskalowe SN/WN)

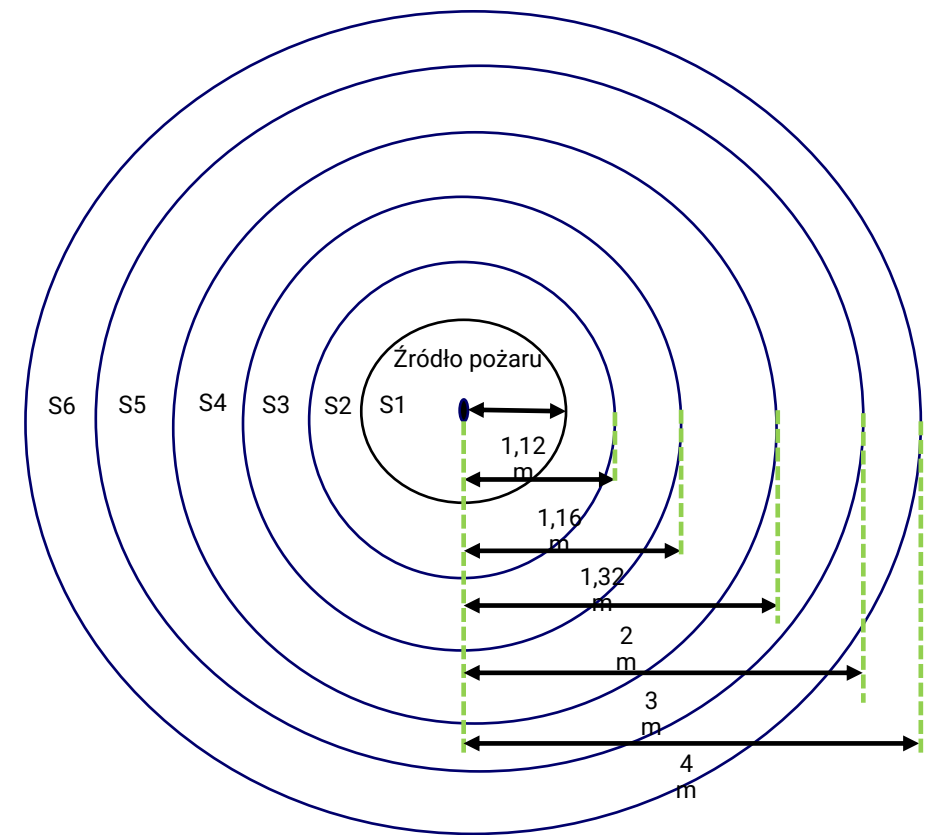
Wnioski i zalecenia

Wartości napięć probierczych i odległości

1	2	3	4	5
Napięcie znamionowe sieci U_n^*	Najwyższe napięcie urządzeń U_m^*	Napięcie probiercze U_d	Odległość d_w przy badaniu wytrzymałości elektrycznej na przebicie	Odległość d_u przy pomiarze prądu upływu
kV	kV	kV	m	m
3	3,6	12	0,75	1,12
6	7,2	23	0,75	1,12
10	12	32	0,77	1,15
15	17,5	45	0,77	1,16
20	24	60	0,81	1,22
30	36	80	0,88	1,32
110	123	265	1,33	2,00
220	245	530	2,00	3,00
400	420	610	2,67	4,00

Wartości maksymalnych dopuszczalnych odległości zbliżenia

1	2	3
Napięcie znamionowe sieci U_n^*	Najwyższe napięcie urządzeń U_m^*	Maksymalna dopuszczalna odległość zbliżenia
kV	kV	m
3	3,6	1,12
6	7,2	1,12
10	12	1,15
15	17,5	1,16
20	24	1,22
30	36	1,32
110	123	2,00
220	245 </td <td>3,00</td>	3,00
400	420	4,00



Strefy względem najwyższych napięć pracy gaszonych urządzeń:

- S1 = 3,6 – 7,2 kV,
- S2 = 12 kV – 17,5 kV,
- S3 = 24 kV – 36 kV,
- S4 = 123 kV,
- S5 = 245 kV,
- S6 = 420 kV

Wnioski i zalecenia

Działania zabezpieczające przed porażeniem podczas gaszenie instalacji fotowoltaicznej

Podejmij próbę odłączenia zasilania farmy fotowoltaicznej. Na zdjęciach przedstawione możliwe miejsca odcięcia energii elektrycznej:

- Skrzynka przyłączeniowa energii elektrycznej do obiektu,
- Przeciwpowozarowy wyłącznik prądu,
- Bezpieczniki/rozłączniki prądu stałego przy inwerterze,
- Przy farmach fotowoltaicznych wyposażonych w stacje transformatorową podejmij próbę z operatorem sieci dystrybucyjnej.



Skrzynka przyłączeniowa



Wyłącznik prądu



Rozłącznik przy inwerterze



Stacja transformatorowa

Wnioski i zalecenia

Bezpieczeństwo i Higiena Pracy – ŚOI w działaniach przy urządzeniach pod napięciem

- ▶ ŚOI kluczowe w ograniczaniu ryzyka porażenia prądem podczas działań gaśniczych w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych
- ▶ 92% jednostek PSP deklaruje posiadanie dodatkowych środków ochrony przeciwporażeniowej
- ▶ Podstawowe wyposażenie:
 - rękawice dielektryczne
 - buty elektroizolacyjne
 - drążki i bosaki izolacyjne
 - przyłbice chroniące przed łukiem elektrycznym
- ▶ Warunek skuteczności ŚOI:
 - certyfikacja i zgodność z normami
 - właściwy dobór do poziomu napięcia i rodzaju zagrożenia
 - dobry stan techniczny i czytelne oznaczenia
- ▶ Regularne badania i konserwacja (szczególnie sprzętu gumowego) są niezbędne dla zachowania właściwości izolacyjnych
- ▶ Najwyższy poziom bezpieczeństwa zapewnia wielowarstwowa ochrona oraz świadomość ograniczeń stosowanego sprzętu



Instytut Energetyki
– Państwowy Instytut Badawczy

Badanie bezpieczeństwa operatorów urządzeń gaśniczych, narażonych na porażenie prądem elektrycznym w trakcie gaszenia pożarów urządzeń znajdujących się pod napięciem

