

Alfred Kałużny<sup>1</sup>, Michał Kałużny<sup>1</sup>, Fryderyk Siewiec<sup>1</sup>

## ANALIZA PRACY IZOLACYJNYCH ODSTĘPÓW POWIETRZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA W REJONACH PRZEMYSŁOWYCH

**Streszczenie:** Ziarna pyłu przemysłowego w powietrzu zmieniają warunki pracy powietrznych odstępów elektroizolacyjnych. Wprowadzają nowe czynniki wzmacniające zarówno procesy jonizacji jak i dejonizacji przestrzeni międzyelektrodowej odstepu izolacyjnego. Zbadanie wpływu zanieczyszczenia powietrza wysokonapięciowych odstępów izolacyjnych ma istotne znaczenie zarówno dla prac projektowych oraz spełnienia wymagań eksploatacyjnych. W referacie podano wstępną analizę roli ziarn pyłu przemysłowego w mechanizmie wyładowania elektrycznego oraz wyniki badań laboratoryjnych wytrzymałości elektrycznej krótkich odstępów izolacyjnych o polu nierówno miernym w funkcji zmian wilgotności i stężenia pyłu przemysłowego w powietrzu.

**Słowa kluczowe:** technika wysokich napięć, wytrzymałość elektryczna, odstepy elektroizolacyjne, zanieczyszczenie powietrza pyłami przemysłowymi.

### 1. Wprowadzenie

Odstępy izolacyjne w liniach i stacjach elektroenergetycznych oraz aparatach elektrycznych w rejonach o zwiększonym stężeniu ziaren ciał stałych pracują w nieco odmiennych warunkach niż te, które charakteryzują obecnie obowiązujące wymagania normatywne [1,2]. W zależności od rodzaju źródeł zanieczyszczenia: przemysłowe, komunalne i pustynne (słonych ziem oraz piaskowe) wpływ pyłów ciał stałych w powietrzu na właściwości izolacyjne odstępów powietrznych ma charakter ciągły lub sezonowy.

Obecnie ocena zarówno jakościowa jak i ilościowa znaczenia zanieczyszczeń powietrza pyłami przemysłowymi na wytrzymałość elektryczną izolacyjnych odstępów powietrznych jest niemożliwa. Brak jest zarówno podstaw teoretycznych jak i wytycznych normatywnych dla uwzględnienia tego zagadnienia w pracach projektowo-konstrukcyjnych i eksploatacyjnych. Aktualne wymagania badań i oceny wytrzymałości elektrycznej izolacyjnych odstępów powietrznych uwzględniają wpływ czynników atmosferycznych jak: ciśnienie, temperatura, wilgotność oraz deszcz. Badania laboratoryjne autora [1,2] oraz w ostatnich latach coraz częściej pojawiające się w literaturze wyniki badań [3] wskazują, że problem ten ma istotne znaczenie dla prawidłowej (bezzakłóceniowej) pracy wysokonapięciowych

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, 44-100 Gliwice, ul. B. Krzywoustego 2

odstępów powietrznych. Wybrane wyniki badań wpływu ziarn pyłów przemysłowych na wytrzymałość elektryczną powietrza przedstawiono w niniejszym opracowaniu.

## 2. Charakterystyka warunków pracy odstępów izolacyjnych

W rejonach przemysłowych powietrze mimo znacznego w ostatnich latach ograniczenia emisji pyłów przemysłowych zawiera znaczne ilości pyłów o charakterze przemysłowym. Wg danych WSEE<sup>1</sup> średnie stężenie pyłów w rejonach zakładów przemysłowych wynosi ok.  $0,1 \div 0,5 \text{ mg/m}^3$ . Zanieczyszczenie powietrza w miejscu zainstalowania urządzeń elektrycznych w otoczeniu procesów technologicznych może wielokrotnie przekroczyć wartości średnie pomierzone przez WSSE. W tych warunkach w polu elektrycznym przestrzeni międzyelektrodowej oprócz cząsteczek powietrza znajdują się ziarna pyłu. Ziarna pyłu o znacznie zróżnicowanej powierzchni i średnicy zastępczej stanowią ciała stałe, złożone ze związków chemicznych o różnym składzie pierwiastkowym. Ziarna pyłu przemysłowego zawierają pierwiastki warunkujące zróżnicowany charakter wiązań międzycząsteczkowych i międzycząsteczkowych, co określa ich rolę podczas działania zewnętrznego pola elektrycznego. Skład chemiczny wybranych pyłów przemysłowych oraz poziom jonizacji pierwiastków składowych ziarn pyłu został podany w tabeli 1. Dla porównania w tabeli 2 podano skład chemiczny powietrza i poziom napięcia jonizacji jednokrotnej pierwiastków składowych.

**Tabela 1.** Wyniki analizy składu chemicznego ziarn pyłu hutniczego i elektrownianego i napięcia jonizacji jednokrotnej pierwiastków składowych

Rodzaj pyłu	Skład chemiczny (%) / napięcie jonizacji $U_j$ [V]								
	SO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Elektrowniany	<u>46,5</u>	<u>17,2</u>	<u>11,0</u>	<u>7,38</u>	<u>4,34</u>	<u>3,28</u>	<u>1,05</u>	<u>0,21</u>	<u>0,06</u>
	8,14	5,96	7,83	6,25	7,4	10,31	6,80	10,30	7,40
Hutniczy	<u>3,9</u>	<u>9,25</u>	<u>74,5</u>	<u>1,7</u>	<u>4,59</u>	<u>1,3</u>	<u>1,93</u>	<u>1,36</u>	<u>0,95</u>
	8,14	5,96	7,83	6,25	7,4	10,31	6,80	10,30	7,40

**Tabela 2.** Skład chemiczny powietrza i napięcia jonizacji jednokrotnej pierwiastków składowych

Składnik powietrza	Azot N <sub>2</sub>	Wodór H <sub>2</sub>	Tlen O <sub>2</sub>	Hel He	Neon Ne	Argon Ar	Krypton Kv	CO <sub>2</sub>	Para wodna	Ksenon Xe
Skład objętościowy	78,0	$5 \times 10^{-5}$	20,9	$5 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-3}$	0,93	$1 \times 10^{-4}$	0,03	~	$\sim 1 \times 10^{-5}$
Napięcie jonizacji $U_j$ [V]	14,48	13,54	13,56	24,45	21,48	16,69	13,94	13,73	12,6	12,08

<sup>1</sup> WSEE – Wojewódzka Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna w Katowicach

Z porównania poziomów napięcia jonizacji jednokrotnej pierwiastków powietrza i składników ziarn pyłu wynika, że napięcie jonizacji pierwiastków składowych ziarn pyłu są znacznie niższe. Należy więc wnioskować, że ziarna pyłu w polu elektrycznym mogą się stać dodatkowymi źródłami ładunków swobodnych w polu elektrycznym odstepu powietrznego. Związki chemiczne tworzące ziarna pyłu w zależności od ich stanu cieplnego zawierają ładunki swobodne, które po podaniu pola elektrycznego ulegają procesowi polaryzacji, co jest przyczyną odkształcenia pola elektrycznego pierwotnego (geometrycznego) i lokalnego wzrostu natężenia pola elektrycznego na drodze wyładowania. Związki chemiczne ziarn pyłu w połączeniu z drobinami wody ulegają częściowemu rozpuszczeniu i w wyniku dysocjacji elektrolitycznej w otoczeniu części stałych ziarn pyłu tworzą się mikroobszary o bardzo dużej gęstości ładunków swobodnych. Wybrane właściwości fizyczne ziarn pyłu przemysłowego mające wpływ na mechanizm wyładowania elektrycznego zestawiono w tabeli 3. Wymiary geometryczne ziarn pyłu znacznie przewyższają wymiary cząsteczek powietrza. Przyjmując, że średnica zastępcza ziarn pyłu przemysłowego jest równa 40  $\mu\text{m}$  (ok. 30% całkowitej ilości ziarn pyłów przemysłowych [5]), to jest ona większa od średnicy cząsteczek powietrza ok.  $1 \cdot 10^5$  razy. Średnica zastępcza ziarn pyłu przemysłowego w porównaniu z drogą swobodną elektronu w powietrzu jest większa ok.  $10^3$  razy. Ziarna pyłu w polu elektrycznym są również czynnikiem warunkującym intensyfikację procesów dejonizacji w odstepie izolacyjnym. Ziarna pyłu znajdujące się na drodze lawiny elektronowej są przegrodą, która hamuje ruch lawin, powodując wychwytywanie ładunków swobodnych, obniżenie temperatury i drogi swobodnej elektronów. W warunkach eksploatacyjnych w przestrzeni pola elektrycznego, odstepu izolacyjnego powietrznego, ziarna pyłu znajdują się w ciągłym ruchu w wyniku oddziaływania sił: grawitacji, konwekcji, inercji i pola elektrycznego. Chaotyczny ruch ziarn pyłu przemysłowego w przestrzeni międzyelektrodowej odstepu izolacyjnego podlega zmianie zależnie od natężenia pola elektrycznego oraz czynników środowiskowych, takich jak: temperatura, wilgotność i prędkość strug powietrza.

**Tabela 3.** Wybrane właściwości fizyczne pyłów przemysłowych

Rodzaj pyłu	Średnica zastępcza ziarn pyłu $d_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Gęstość masy $m_w$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Procentowa zawartość cząstek rozpuszczalnych [%]	Konduktywność wodnego roztworu ziarn pyłu $\kappa$ [ $\mu\text{S}/\text{m}$ ]
Elektrowniany	0 - 100 40,6 <sup>1)</sup>	3,12	14,51	$16,8 \cdot 10^3$
Metalurgiczny	0 - 100 29,3 <sup>1)</sup>	4,33	4,63	$11,7 \cdot 10^3$
1) - Zakład Pom. Bad. „Energopomiar” Gliwice, Woj. Stacja Sanitarно-Epidemiologiczna i Geoprojekt Wrocław				

Wzajemne relacje wyżej scharakteryzowanych właściwości ziarn pyłu w przestrzeni powietrznej odstepu izolacyjnego objętej polem elektrycznym pozwalają na postawienie tezy, że ziarna pyłu przemysłowego w powietrzu mają istotne znaczenie w definiowaniu warunków oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego oraz mechanizmu zapłonu i rozwoju wyładowania elektrycznego w izolacyjnych odstepach powietrznych.

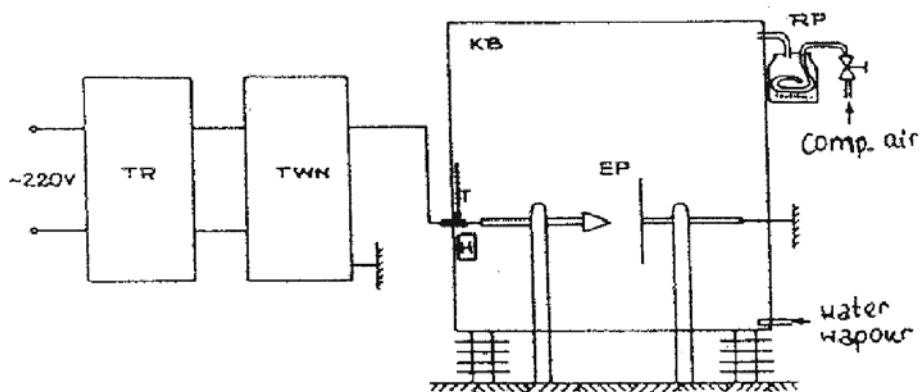
### 3. Badania eksperymentalne wpływu ziarn pyłu na wytrzymałość elektryczną powietrznego odstępów izolacyjnych

Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego ziarnami pyłu przemysłowego, jak pokazały wcześniejsze badania [2], zmienia się przy stałej temperaturze i ciśnieniu powietrza, zależnie od koncentracji ziarn pyłu i przede wszystkim od jego wilgotności (zawartości drobiny wody). Wyniki badań wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym 50 Hz powietrza zanieczyszczonego przykładowym pyłem (elektrowniarny) pokazano na rys. 1. Ponieważ prawie wszystkie techniczne odstępki izolacyjne powietrza pracują w warunkach pola elektrycznego nierównomiernego, istnieje zatem szczególna potrzeba badań i oceny wpływu zanieczyszczenia powietrza pyłem przemysłowym na wytrzymałość elektryczną odstępów izolacyjnych o polu nierównomiernym.

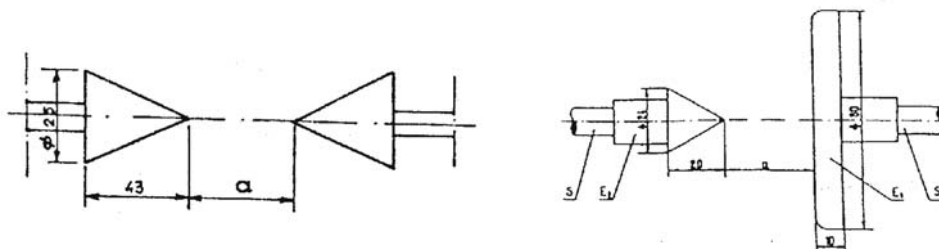
#### 3.1. Metodyka badań

Pomiary laboratoryjne poziomu napięcia przeskoku w układzie izolacyjnym typu ostrze-ostrze- płyta zostały przeprowadzone w układzie laboratoryjnym wyposażonym w specjalną komorę o objętości 1,2 m<sup>3</sup>, przedstawionym na rys. 1.

Koncentrację pyłu [mg/m<sup>3</sup>] określono metodą wagową. Próbę wytrzymałości elektrycznej dla określonego rodzaju odstępki izolacyjnego wg rys. 2 wykonywano przy regulowanym napięciu na odstępki izolacyjnym z przyrostem ok. 1 kV/s. Ze względu na grawitacyjne opadanie ziarn pyłu w komorze badań, próbę wytrzymałości elektrycznej odstępki izolacyjnego dla zadanych warunków wilgotności i stężenia pyłu wykonano w dwóch seriach, po 5 pomiarów w każdej serii. Wartość napięcia przeskoku określano jako średnią z 10 pomiarów wg zaleceń PN [6].



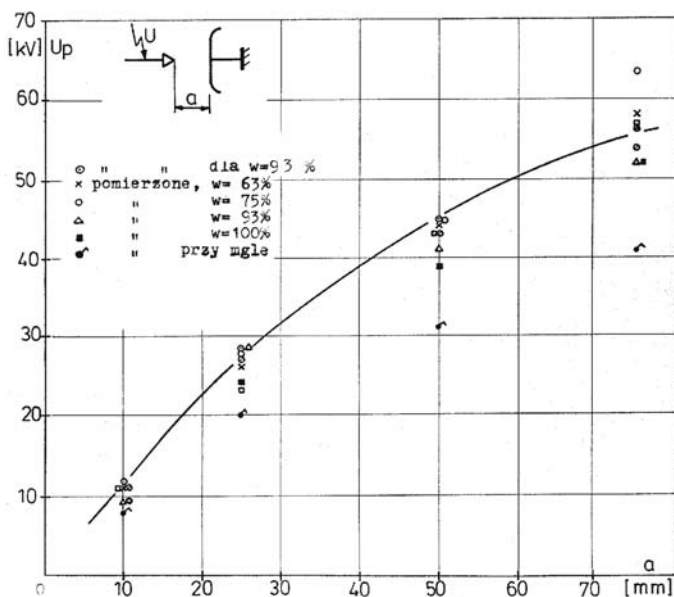
Rys. 1. Schemat układu laboratoryjnego. TR – transformator regulacyjny, TWN – transformator próbnicy; KB – komora badań; OB – układ elektrod wg rys. 2; H – higrometr; T – termometr; RP – dysza wdmuchiwania mieszanki pyłowo-powietrznej



Rys. 2. Kształt i wymiary elektrod pomiarowych

### 3.2. Wyniki badań

Wyniki pomiarów poziomu napięcia przeskoku odstępów izolacyjnych są wypadkową oddziaływania wielu funkcji zmiennych losowych czynników stanu obiektu badanego (mieszanki powietrza i pyłu przemysłowego) oraz błędów pomiarowych. Dla ograniczenia wpływu błędów pomiarowych na wnioski z analizy wyników pomiarowych zastosowano wielokrotne powtarzanie pomiarów i obróbkę statystyczną uzyskanych danych pomiarowych. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono w postaci graficznej na rys. 3, 4 i 5.

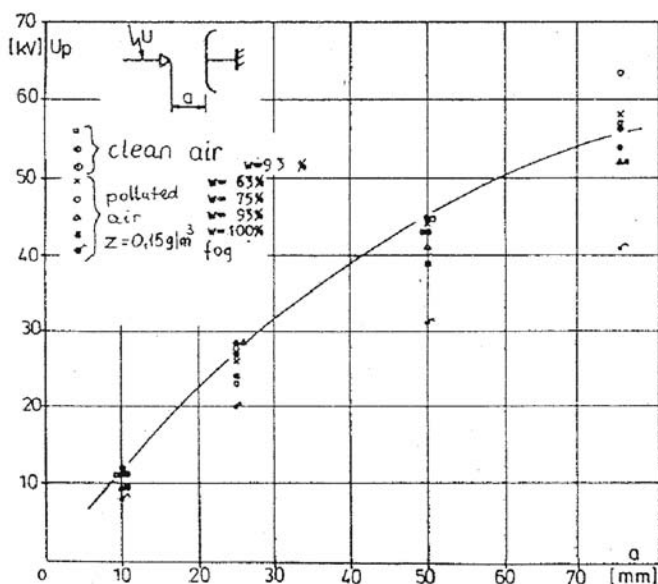


Rys. 3. Zależność napięcia przeskoku układu ostrze-ostrze dla różnego stanu powietrza w funkcji odległości elektrod

### 3.3. Analiza wyników badań

Wyniki pomiarów pokazują, że w krótkich przerwach iskrowych rzędu 10-30 mm wprowadzenie ziarn pyłu przemysłowego wpływa na osłabienie intensywności rozwoju lawin

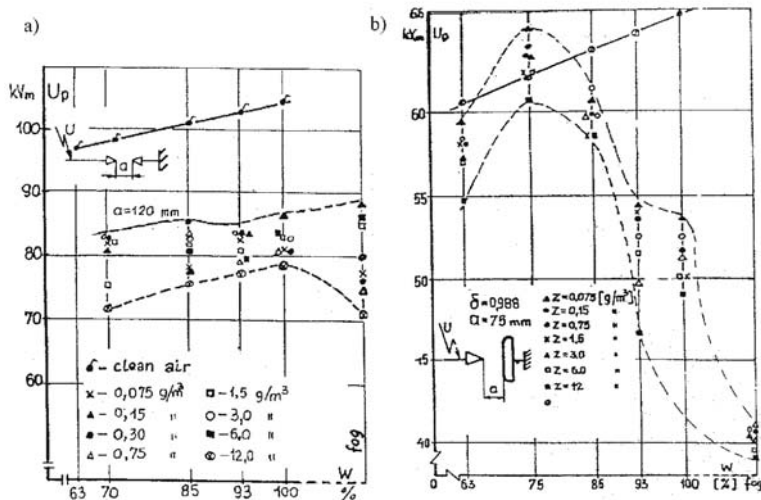
elektronowych, czego wyrazem jest zauważalny wzrost poziomu napięcia przeskoku dla zadanej długości drogi przeskoku w funkcji rosnącego stężenia zapylenia powietrza. Dla rosnącej długości drogi wyładowania elektrycznego  $a > 30$  mm, coraz istotniejszą rolę odgrywają ziarna pyłu przemysłowego w powietrzu w mechanizmie zapłonu i rozwoju wyładowania elektrycznego. Co prawda poziom napięcia przeskoku rośnie ze wzrostem drogi wyładowania, jednak gradient przyrostu (nachylenia) krzywej napięcia przeskoku  $U_{ps} = f(a)$  jest mniejszy w porównaniu z charakterystyką dla powietrza czystego (rys. 4).



Rys. 4. Zależność napięcia przeskoku układu ostrze-plyta dla różnego stanu powietrza w funkcji odległości elektrod

Znacznie wyraźniejszy wpływ na poziom napięcia przeskoku w powietrzu zanieczyszczonym ziarnami pyłu przemysłowego uwidacznia się ze wzrostem wilgotności powietrza (rys. 5). Dla wilgotności powietrza powyżej 80% znaczenie ziarn pyłu w mechanizmie wyładowania elektrycznego uwidacznia się odwróceniem tendencji zmiany poziomu napięcia przeskoku w odstępie izolacyjnym. W powietrzu czystym drobiny wody powodują nieznaczny przyrost wytrzymałości elektrycznej odstepu izolacyjnego, natomiast w powietrzu zanieczyszczonym ziarnami pyłu przemysłowego obserwujemy obniżanie się poziomu napięcia przeskoku od ok. 9% dla wilgotności względnej 100% do około 30% dla wilgotności nasycenia (mgła) w komorze badań.

Interesujące wyniki uzyskano dla pracy odstepu izolacyjnego przy dużym i bardzo dużym stężeniu ziarn pyłu, które opublikowano w pracy [2], dotyczące zmian poziomu napięcia przeskoku iskiernika ostrzowego z jednym biegunem uziemionym przy wilgotności nasycenia (mgła) w funkcji rosnącego stężenia ziarn pyłu. Badania te ujawniają istnienie pewnego obszaru nieoznaczoności, w którym odstęp izolacyjny może wytrzymać określone napięcie lub też może nastąpić przeskok. Nieoznaczoność ta może wystąpić dla odstępów izolacyjnych o drodze wyładowania krótszej od 100 mm.



Rys. 5. Zależność napięcia przeskoku odstepu izolacyjnego przy różnym stężeniu pyłu w funkcji wilgotności. a) w układzie ostrze-ostrze uziemione b) w układzie ostrze-płyta uziemione

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Wyniki pomiarów laboratoryjnych poziomu napięcia przeskoku odstepu izolacyjnego o polu nierównomiernym w powietrzu zanieczyszczonym ziarnami pyłu przemysłowego potwierdziły przypuszczenia postawione we wstępie artykułu. Mechanizm wyładowania elektrycznego w gazozolu (mieszanina drobin powietrza i ziarn pyłu przemysłowego) jest zależny od stężenia pyłu oraz stanu wilgotności powietrza i długości drogi wyładowania (odległości pomiędzy elektrodami). Analizując przebieg zmian poziomu napięcia przeskoku w funkcji zarówno stężenia ziarn pyłu, jak i wilgotności powietrza można zauważyć, że zmienia się istotność roli ziarn pyłu w mechanizmie wyładowania. Dla zadanej wilgotności większe znaczenie mają czynniki aktywizujące wyładowanie, dla innego stanu zawilgocenia taka koncentracja ziarn stanowi istotniejsze znaczenie w procesie dejonizacji. W innym natomiast przypadku zależności te mogą mieć odmienny charakter. Niezależnie jednak od jednostkowego charakteru poszczególnych stanów medium izolacyjnego i ich roli w mechanizmie wyładowania, wyniki badań jednoznacznie pokazują, że wytrzymałość elektryczna odstepu izolacyjnego, mierzona poziomem napięcia przeskoku maleje, zwłaszcza w stanie całkowitego nasycenia wodą cząsteczek powietrza (mgły). Pełne wyjaśnienie roli poszczególnych stanów fizycznych gazozolu w funkcji wilgotności wymagać będzie znacznego poszerzenia zakresu badań laboratoryjnych. Wnioski wynikające z dotychczasowych prac badawczych są następujące.

1. Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym w układach izolacyjnych powietrznych o polu pierwotnie nierównomiernym w sposób istotny zależna jest od stężenia ziarn pyłu i wilgotności powietrza.

2. Poziom napięcia przeskoku odstepu izolacyjnego z gazozolem maleje po przekroczeniu wilgotności względnej powietrza 80%. Bardzo silny wpływ koncentracji ziarn pyłu przemysłowego na obniżenie poziomu napięcia przeskoku odstepu izolacyjnego uwidacznia

się w pobliżu wilgotności nasycenia (mgła). Wówczas poziom napięcia przeskoku odstepu izolacyjnego z gazozolem, o drodze wyładowania 120 mm, maleje w stosunku do warunków normalnych powietrza do 30% w zależności od stężenia ziarn pyłu w powietrzu.

3. Wpływ zanieczyszczenia powietrza pyłem przemysłowym na poziom napięcia przeskoku odstepu izolacyjnego rośnie ze wzrostem odległości między elektrodami.

4. Wyniki badań laboratoryjnych uzasadniają potrzebę dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych, które umożliwią opracowanie użytecznych modeli matematycznych oceny wytrzymałości odstępów izolacyjnych powietrznych w różnych warunkach klimatycznych i środowiskowych (zapylenia) z uwzględnieniem rodzaju i stężenia ziarn pyłu.

### Literatura

- [1] **Kałużny A.:** *Wpływ pyłów przemysłowych na wytrzymałość elektryczną odstępów izolacyjnych powietrznych.* ZN Pol. Śląskiej „elektryka“, z. 127, 1992r., ss. 227-240.
- [2] **Kałużna U., Kałużny A.:** *Electric strength of high voltage insulating gap in polluted air.* Proceedings of 9thISH, Graz 1995, Subject 2, rep. 2155.
- [3] **Qureshi M.I. i in.:** *Performance of protective rod gaps for medium voltage networks in the presence of dust particles under lighting impulses.* IEEE Trans. on P.D., Vol. 14, Nr 4, 1999, ss. 1311-1316.
- [4] **Rizk F.A.M.:** *Effect of conducting objects on critical switching impulse breakdown of long air gap.* CIGRE, Session 1994r.
- [5] **Buła D.:** *Praca dyplomowa magisterska.* Politechnika Śląska. Gliwice, 1995 r.
- [6] **PN-87/E-04053:** *Pomiary wysokonapięciowe.*

### WORKING OF THE H.V. INSULATION AIR GAPS IN INDUSTRIAL REGION

Insulating air gaps in H.V. electrical devices established in industrial regions very often work in quite different conditions than the normal ones. A variable concentration of the dust grains and water particles in electric field create in insulating medium new conditions for electrical discharges ignition and development. Results of laboratory tests carried out in order to examine the influence of industrial dust upon the electric strength in short insulating gaps in polluted air with non-uniform electric field at power frequency as well as analysis of those results have been presented in this paper.