



Alfred J. Kałużny*

WPŁYW ZIARN PYŁU PRZEMYSŁOWEGO NA WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNĄ WYSOKONAPIĘCIOWYCH ODSTĘPÓW IZOLACYJNYCH

Streszczenie: Odstępki izolacyjne urządzeń elektrycznych liniowych i stacyjnych w.n. zainstalowane w rejonach przemysłowych pracują w warunkach znacznie różniących się od normalnych. Powietrze jako dielektryk zawiera ziarna pyłów przemysłowych o właściwościach fizycznych zależnych od rodzaju źródła zanieczyszczenia. Brak rozeznania problemu wpływu pyłu przemysłowego na mechanizm wyładowania elektrycznego i wytrzymałość elektryczną może być jedną z istotnych przyczyn zakłóceń w pracy urządzeń elektrycznych w.n.

W referacie przedstawiono uproszczoną analizę czynników warunkujących wyładowanie elektryczne w mieszaninie powietrza i ziarn pyłu przemysłowego oraz wybrane wyniki badań laboratoryjnych wytrzymałości od stężenia ziarn pyłu i wilgotności powietrza.

Słowa kluczowe: aerozol, pył przemysłowy, wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego

1. Wprowadzenie

Dotychczasowe badania teoretyczne i eksperymentalne mechanizmu wyładowania elektrycznego w powietrznych układach izolacyjnych w.n. jako dielektryk przyjmują powietrze czyste oraz istniejące w nim drobiny wody. Również wytyczne projektowe i wymagania normatywne badania i oceny wytrzymałości elektrycznej izolacyjnych odstępów powietrznych [1] w urządzeniach elektrycznych nie uwzględniają wpływu

* Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

ziarn pyłu przemysłowego. Badania laboratoryjne autora [2,3] wskazują, że ziarna pyłu wprowadzone w obszar działania pola elektrycznego wpływają na poziom wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnych powietrznych.

2. Charakterystyka medium izolacyjnego (gazozolu)

Ziarna pyłu przemysłowego tworzą z powietrzem mieszaninę gazozolu, jako medium izolacyjne pomiędzy elektrodami w polu elektrycznym.

Ziarna pyłu przemysłowego są ciałami stałymi, zawierające różne pierwiastki, jako produkty odpadowe procesów przemysłowych-technologicznych lub im towarzyszących. Materiały tworzące ziarna pyłu zawierają związki rozpuszczalne i nierozpuszczalne w wodzie o różnym składzie chemicznym. Pierwiastki zawarte w ziarnach pyłu posiadają różny poziom energii emisji swobodnych ładunków elektrycznych — napięcia jonizacji. Wyniki analizy składu chemicznego wybranych pyłów oraz poziomu napięcia jonizacji jednokrotnej pierwiastków składowych zestawiono w tabeli 1. Skład chemiczny powietrza jako medium izolacyjne zestawiono w tabeli 2.

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]								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₃ O ₄
Elektrowniany	46.5	17.2	11.0	7.38	4.34	3.28	1.05	0.21	0.06
	8.14	5.96	7.83	6.25	7.4	10.31	6.80	10.30	7.40
Hutniczy	3.9	9.25	74.5	1.7	4.59	1.3	1.93	1.36	0.95
	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 ₂	Wodór H ₂	Tlen O ₂	Hel He	Neon Ne	Argon Ar	Krypton Kv	CO ₂	Para wodna	Ksenon Xe
Skład procentowy	78,0	5 ×10 ⁻⁵	20,9	5 ×10 ⁻⁴	1,5 ×10 ⁻³	0,93	1 ×10 ⁻⁴	0,03	~	~1 ×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

Z porównania poziomów napięcia jonizacji jednokrotnej pierwiastków składowych ziarn pyłu przemysłowego i pierwiastków składowych powietrza wynika, że napięcie jonizacji pierwiastków składowych ziarn pyłów przemysłowych są znacznie niższe niż pierwiastków składowych powietrza. Związki chemiczne tworzące ziarna pyłu

w wyniku oddziaływania drobin wody (pary wodnej) ulegają rozpuszczaniu. Procentowy udział cząstek rozpuszczalnych w wodzie oraz wybrane właściwości fizyczne pyłu hutniczego (zakład metalurgiczny) oraz elektrownianego (elektrownia węglowa) przedstawiono w tabeli 3.

Badania średnicy zastępczej ziarn pyłów przemysłowych pokazują, że największy udział ok. 60% stanowią ziarna pyłu o średnicy zastępczej równej $2,7 \div 30$ mm. Natomiast ziarna pyłu o średnicy $30 \div 60$ mm stanowią ok. 28% całkowitej ilości ziarn pyłów przemysłowych [4].

Tabela 3. Wybrane właściwości fizyczne pyłów przemysłowych

Rodzaj pyłu	Średnica zastępcza ziarn pyłu	Gęstość masy	Procentowa zawartość cząstek rozpuszczalnych	Konduktywność wodnego roztworu ziarn pyłu
	d_z [mm]	d [g/cm ³]	[%]	κ [μS/m]
Elektrowniany	0–100 40,6 ¹⁾	3,12	14,51	16,8·10 ³
Metalurgiczny	0–100 29,3 ¹⁾	4,33	4,63	11,7·10 ³

¹⁾ — Zakład Pomiarowo Badawczy „Energopomiar” Gliwice, Wojewódzka Stacja Sanitarno-Epidemiologiczna i Geoprojekt Wrocław

Ziarna pyłu w normalnych warunkach w powietrzu znajdują się w ciągłym ruchu w wyniku działania nań sił: grawitacji, konwekcji oraz inercji. W obszarze pola elektrycznego technicznych układów izolacyjnych powietrznych ten chaotyczny ruch ziarn pyłu ulega zmianie zależnie od uwarunkowań oddziaływania pola elektrycznego oraz czynników środowiskowych, jak: prędkość strug wiatru, wilgotność i temperatura powietrza. Wymiary geometryczne ziarn pyłu znacznie przewyższają wymiary cząsteczek powietrza. Przyjmując, że średnia średnica zastępcza ziarn pyłu przemysłowego równa jest ok. $40 \mu\text{m}$, to jest ona większa od średnicy cząsteczek powietrza ok. $1 \cdot 10^5$ razy. Również średnica zastępcza ziarn pyłu jest wielokrotnie większa od drogi swobodnej pomiędzy cząsteczkami powietrza. Przyjmując drogę swobodną ruchu elektronów w powietrzu w warunkach normalnych równą $l_e = 0,04569 \mu\text{m}$, to jest ona około 1000 razy mniejsza w porównaniu ze średnicą ziarn pyłu elektrownianego.

3. Znaczenie ziarn pyłu w mechanizmie wyładowania elektrycznego

Analizując zjawisko jonizacji warunkujące zapłon i rozwój wyładowania elektrycznego w mieszaninie gazozolu w polu elektrycznym można stwierdzić, że podobnie jak cząsteczki gazu również cząsteczki ziarn pyłu przemysłowego podlegają wpływom czynników jonizacji zewnętrznej.

Fotojonizacja możliwa jest gdy energia fotonu jest większa od energii jonizacji drobin ośrodka izolacyjnego:

$$h \cdot \nu > w_j \quad (1)$$

gdzie: h – stała Plancka ($h = 6,54 \cdot 10^{-34}$ Js), ν – częstotliwość fali świetlnej ($\nu = c/\lambda$), w_j – energia jonizacji cząsteczek.

Energia jonizacji cząsteczek składowych ziarn pyłu jest znacznie niższa od energii jonizacji cząsteczek gazów — składników powietrza. Z tego wynika, że ziarna pyłu w powietrzu są czynnikiem aktywizującym proces fotojonizacji i przyrostu liczby swobodnych ładunków elektrycznych w przestrzeni międzyelektrodowej. Ziarna pyłów przemysłowych (elektrowniane) posiadające w swoim składzie atomy pierwiastków promieniotwórczych są również czynnikiem aktywizującym procesy jonizacji atomów innych pierwiastków składowych ziarn pyłu oraz cząsteczek powietrza. Ma to również wpływ na przyrost liczby ładunków swobodnych w przestrzeni międzyelektrodowej odstępu izolacyjnego wyzwolonych bez udziału pola elektrycznego.

Jonizacja cieplna jest wynikiem wzrostu energii wewnętrznej atomów co umożliwia przejście elektronów walencyjnych poza obszar oddziaływania jądra atomowego oraz wzrostu ruchliwości cząsteczek i ich energii kinetycznej, co warunkuje utworzenie się ładunków swobodnych w wyniku zderzeń niesprężystych. Stopień jonizacji gazu (powietrza) przy określonej temperaturze T określa zależność:

$$p \frac{n_i^{*2}}{1 - n_i^{*2}} = 2,4 \cdot 10^{-4} T^{2,5} \exp \left(-\frac{q_e U_j}{kT} \right) \quad (2)$$

gdzie: p – suma ciśnień cząstkowych wszystkich składowych gazów, n_i^* – udział jonizowanych cząsteczek powietrza do całkowitej liczby cząsteczek, U_j – potencjał jonizacji gazu, k – stała Boltzmana, q_e – ładunek elektronu.

W powietrzu zanieczyszczonym ziarnami pyłów przemysłowych możliwy jest wzrost aktywności jonizacji termicznej gazozolu ze względu na niższy poziom energii jonizacji atomów pierwiastków wchodzących w skład ziarn pyłów w porównaniu z energią jonizacji cząsteczek powietrza, co ilustrują tabele 1 i 2.

Emisja elektronów z powierzchni metali. Wyzwolenie elektronów z atomów na powierzchni metali, przy ich bombardowaniu dodatnimi jonami uwarunkowane jest energią jonów. Aby było możliwe wybitcie elektronów z powierzchni metalowej katody, to energia jonów powinna być dwukrotnie większa od pracy wyjścia W_p elektronów z metalu $W_j \geq 2W_p$. Praca wyjścia większości pierwiastków metali wchodzących w skład ziarn pyłów przemysłowych spełnia powyższy warunek i jest dwukrotnie mniejsza od energii jonizacji gazów (powietrza)¹. Gęstość prądu autoemisji z powierzchni metalowych elektrod opisuje zależność:

$$j_k = \frac{q_e^2}{2\pi h U_0} \sqrt{\frac{U_{0m} - U_{wyj}}{U_{wyj}}} E^2 D \quad (3)$$

¹W warunkach powietrza czystego prawdopodobieństwo wyzwolenia elektronu z powierzchni katody jest stosunkowo małe i wynosi około $10^{-3} \div 10^{-4}$.

gdzie: j_k – gęstość prądu emisji katody, D – współczynnik równy kwadratowi amplitudy fali elektronów za przedziałami energii wzbronionej, E – natężenie pola elektrycznego, U_{wyj} – napięcie wyjścia elektronu z pasma walencyjnego, U_{0m} – głębokość dołu potencjalnego w metalu.

Wpływ na gęstość prądu emisji katody mają nierówności jej powierzchni.

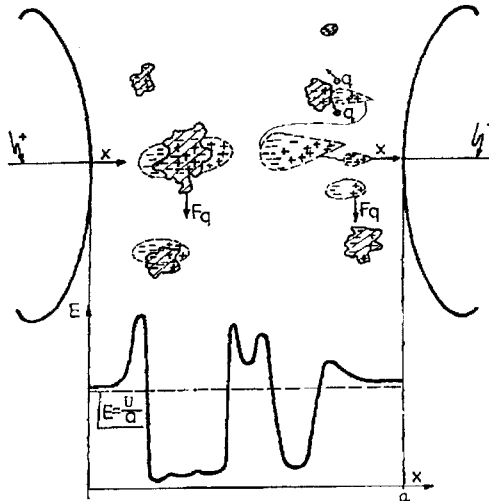
Jonizacja zderzeniowa. Zderzenia swobodnych elektronów z cząsteczkami powietrza mogą powodować przyrost nośników ładunku elektrycznego (elektronów i jonów) w przestrzeni międzyelektrodowej. Proces jonizacji zderzeniowej w gazach (powietrzu) opisuje teoria Townsenda z której wynika, że liczba jonizacji przy zderzeniach elektronu z cząsteczkami powietrza na jednostkowej drodze pomiędzy elektrodami jest proporcjonalna do gęstości względnej powietrza d i prawdopodobieństwa jonizacji przy zderzeniach, co opisuje pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda α .

$$\frac{\alpha}{p} = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{E_j}{Eq\lambda}} \quad (4)$$

gdzie: E_j – energia jonizacji cząstek gazu, $Eq\lambda$ – energia elektronu pobrana z pola o natężeniu E na drodze swobodnej l , q – ładunek elektryczny jonu lub elektronu.

Wynika z tego, że jeżeli energia ładunku swobodnego na drodze swobodnej λ w polu elektrycznym o natężeniu E osiągnie wartość energii jonizacji cząsteczek powietrza w zadanej temperaturze, to może mieć miejsce jonizacja zderzeniowa i wówczas spełniona jest zależność:

$$Eq\lambda \geq E_j \quad (5)$$



Rys. 1. Ilustracja wpływu ziarn pyłu przemysłowego na rozkład natężenia pola wzdłuż osi x pomiędzy elektrodami

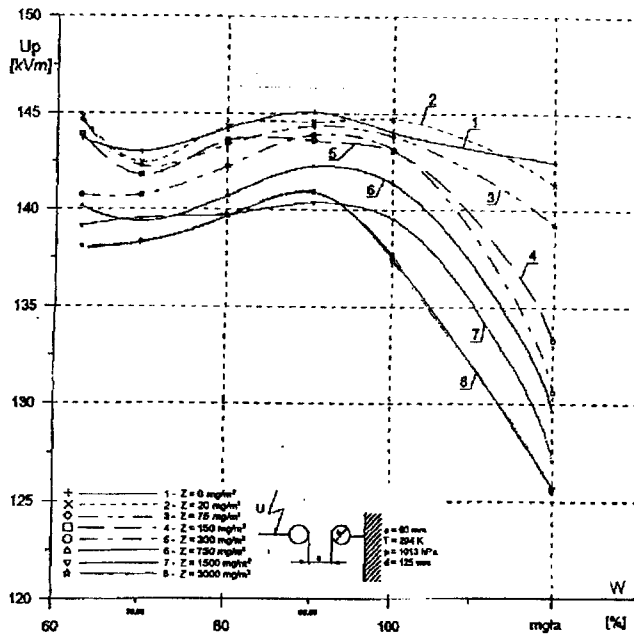
W przypadku wprowadzenia ziarn pyłu w obszar działania pola elektrycznego warunki jonizacji zderzeniowej ulegają zmianie. Spowodowane jest to zmniejszeniem się drogi swobodnej elektronów i jonów oraz znacznymi zmianami (wzrostu) natężenia lokalnego pola elektrycznego, w otoczeniu ziarn pyłu na drodze między elektrodami. Wpływ ziarn pyłu przemysłowego na rozkład natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej przedstawiono na rysunku 1.

4. Wyniki badań eksperymentalnych

Badania wpływu ziarn pyłu przemysłowego na wytrzymałość elektryczną statyczną przy napięciu przemiennym wykonano w specjalnej komorze o pojemności ok. $1,2\text{ m}^3$. Procedurę badań laboratoryjnych opisano w [2, 3].

Elektrody pomiarowe zapewniały w przestrzeni międzyelektrodowej wzdłuż drogi wyładowania pole elektryczne o rozkładzie prawie równomiernym. Podczas pomiarów napięcia przeskoku, dla zadanego poziomu stężenia pyłu, zmieniano wilgotność powietrza w komorze, przy prawie stałej temperaturze.

Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej statycznej powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym zestawiono w ujęciu graficznym na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność wytrzymałości elektrycznej powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym w funkcji wilgotności

5. Podsumowanie i wnioski

Z analizy teoretycznej wpływu ziarn pyłu przemysłowego na mechanizm zapłonu i rozwoju wyładowania elektrycznego widać jak bardzo jest to problem uwikłany. Ziarna pyłu są z jednej strony czynnikiem sprzyjającym procesowi wzrostu liczby ładunków swobodnych (jonizacji) w przestrzeni międzyelektrodowej, a z drugiej są czynnikiem aktywizacji procesu przeciwnego (rekombinacji). Próba jednoznacznej oceny zjawisk fizycznych jest możliwa w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. Przeprowadzone badania, z których wybrane wyniki przedstawiono na rysunku 4 pozwalają na podanie następujących wniosków:

- Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego ziarnami pyłu przemysłowego w polu elektrycznym pierwotnie równomiernym w sposób istotny zależy od stężenia ziarn pyłu i wilgotności powietrza.
- Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego o zwiększonej wilgotności maleje po przekroczeniu wilgotności względnej (85–90)°. Bardzo silny wpływ koncentracji ziarn pyłu przemysłowego na wytrzymałość elektryczną odstepu izolacyjnego uwidacznia się w pobliżu wilgotności nasycenia (mgła). Wówczas obniżenie wytrzymałości elektrycznej powietrza w stosunku do wytrzymałości normalnej może osiągnąć poziom $(0,95 \div 0,75)$ w zależności od stężenia pyłu w powietrzu.
- Zależność wytrzymałości elektrycznej powietrza, o zwiększonej wilgotności, od stężenia ziarn pyłu przemysłowego rośnie ze wzrostem odległości między elektrodami.
- Wyniki doświadczeń laboratoryjnych uzasadniają potrzebę podjęcia dalszych badań eksperymentalnych i teoretycznych, które pozwolą na opracowanie modeli matematycznych oceny wytrzymałości odstepów powietrznych z uwzględnieniem rodzaju i koncentracji ziarn pyłów przemysłowych.

Literatura

- [1] PN-87/E-04053. *Pomiary wysokonapięciowe*
- [2] **Kałużny A.**: *Wpływ pyłów przemysłowych na wytrzymałość elektryczną odstepów izolacyjnych powietrznych*. ZN Politechnika Śląska „Elektryka”, z. 127, 1992 r., s. 227–240
- [3] **Kałużna U., Kałużny A.**: *Electric strength of high voltage insulating gap in polluted air*. Proceedings of 9th ISH Graz 1995, Subject 2, rep. 2155
- [4] **Bula D.**: *Praca dyplomowa magisterska*. Politechnika Śląska, 1995

INFLUENCE OF INDUSTRIAL DUST ON ELECTRIC STRENGTH OF H.V. INSULATING GAPS

A variable concentration of the dust grains and water particles in electrical field creates in insulating medium new conditions for ignition and development of electrical discharges.

The analysis of electrical discharges and results of measurements of electric strength of the insulating gap with air polluted by industrial dust grains and water particles has been presented in this paper.