ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: ELEKTRYKA z. 174 Nr kol. 1472

Alfred J. KAŁUŻNY
Mariusz KASPRZYK

ANALIZA WPŁYWU ZIARN PYŁU PRZEMYSŁOWEGO I WILGOTNOŚCI NA WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNĄ POWIETRZA

Streszczenie. Odstępy izolacyjne urządzeń elektrycznych liniowych i stacyjnych wn. zainstalowanych 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 ziarn pyłu przemysłowego na mechanizm wyładowania elektrycznego i wytrzymałość elektryczną może być jedną z istotnych przyczyn zakłóceń w pracy urządzeń elektrycznych wn.

W artykule przedstawiono analizę wybranych czynników warunkujących wyładowanie elektryczne w mieszaninie powietrza i ziarn pyłu przemysłowego oraz dotychczasowe wyniki badań laboratoryjnych wytrzymałości elektrycznej w funkcji stężenia ziarn pyłu i wilgotności powietrza.

INFLUENCE OF INDUSTRIAL DUST GRAINS AND AIR HUMUDITY ON ELECTRIC STRENGTH OF HV INSULATING GAPS

Summary. 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 an water particles has been presented in this paper.

1. WPROWADZENIE

Dotychczasowe badania teoretyczne i eksperymentalne mechanizmu wyładowania elektrycznego w powietrznych układach izolacyjnych wn. jako dielektryk przyjmują powietrze czyste oraz istniejące w nim drobiny wody. Również wytyczne projektowe i wymagania normatywne badań i oceny wytrzymałości elektrycznej izolacyjnych odstępów powietrznych

[1] w urządzeniach elektrycznych nie uwzględniają wpływu ziarn pyłu przemysłowego. Badania laboratoryjne autorów [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 materiał izolacyjny. W przemysłowych napowietrznych odstępach izolacyjnych dielektryk pomiędzy elektrodami w polu elektrycznym jest zwykle mieszaniną ziarn pyłu przemysłowego z powietrzem (gazozol).

Ziarna pyłu przemysłowego są ciałami stałymi, które zawierają w swoim składzie różne pierwiastki, będące produktami odpadowymi procesów przemysłowo-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 czystego materiału izolacyjnego 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_i [V]								
	S_iO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	P_2O_5	Mn_3O_4
Elektrowniany	46,5 8,14	17,2 5,96	11,0 7,83	7,38 6,25	4,34 7,4	3,28 10,31	1,05 6,80	0,21 10,30	0,06 7,40
Hutniczy	3,9 8,14	9,25 5,96	74,5 7,83	1,7 6,25	4,59 7,4	1,3 10,31	1,93 6,80	1,36 10,30	0,95 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 Kr	CO_2	Para wodna	Ksenon Xe
Skład objętościowy	78,0	$5x10^{-5}$	20,9	$5x10^{-4}$	$1,5x10^{-3}$	0,93	$1x10^{-4}$	0,03	~	$\sim 1x10^{-5}$
Napięcie jonizacji U_i [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 jest znacznie niższe niż pierwiastków składowych powietrza. Związki chemiczne tworzące ziarna pyłu w wyniku oddziaływania drobin wody (pary wodnej) ulegają rozpuszczaniu. W wyniku dysocjacji elektrolitycznej w otoczeniu części stałych ziarn pyłu tworzą się mikroobszary o dużej gęstości ładunków swobodnych. 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÷30 μm. Natomiast ziarna pyłu o średnicy 30 ÷ 60 μm stanowią ok. 28 % całkowitej ilości ziarn pyłów przemysłowych [4].

Tabela 3

Wybrane właściwości fizyczne pyłów przemysłowych

Rodzaj pyłu	Średnica zastępcza ziarn pyłu d_z [μm]	Gęstość masy m_w [g/cm^3]	Procentowa zawartość cząstek rozpuszczalnych [%]	Konduktywność wodnego roztworu ziarn pyłu κ [μS/m]
Elektrowniany	0 - 100 40,6[1)]	3,12	14,51	$16{,}8 \cdot 10^3$
Metalurgiczny	0 - 100 29,3[1)]	4,33	4,63	$11{,}7 \cdot 10^3$
[1)] ZPBE „Energopomiar" Gliwice, Woj. 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, takich 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 μm, 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 μm, to jest ona około 1000 razy mniejsza w porównaniu ze średnicą ziarn pyłu elektrownianego.

Wzajemne relacje wyżej wyszczególnionych właściwości fizycznych gazozolu pozwalają na postawienie tezy, że ziarna pyłu przemysłowego w powietrzu mają istotne znaczenie w definiowaniu warunków oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego oraz mechanizmie zapłonu i rozwoju wyładowania elektrycznego w izolacyjnych odstępach powietrznych.

3. ROLA ZIAREN 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.

F o t o j o n i z a c j a jest możliwa, gdy energia fotonu jest większa od energii jonizacji drobin ośrodka izolacyjnego, wyrażonego zależnością:

$$h\nu > w_j, \tag{1}$$

gdzie: h - stała Plancka ($h = 6{,}54 \cdot 10^{-34}$ J·s), 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 (elektrownianych) posiadające w swoim składzie śladowe ilości atomów 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.

J o n i z a c j a c i e p l n a jest wynikiem wzrostu energii wewnętrznej atomów, co umożliwia przejście elektronów walencyjnych poza obszar oddziaływania jądra atomowego oraz wzrostu ruchliwości cząsteczek i ich energii kinetycznej. Jonizacja cieplna warunkuje tworzenie się ładunków swobodnych w wyniku zderzeń niesprężystych. Stopień jonizacji gazu (powietrza) przy określonej temperaturze T określa zależność:

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

gdzie: p = suma ciśnień cząstkowych wszystkich składowych gazu, 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.

E m i s j a e l e k t r o n ó w z p o w i e r z c h n i m e t a l i. Wyzwolenie elektronów z atomów na powierzchni metali przy ich bombardowaniu dodatnimi jonami uwarunkowane jest energią jonów. Aby było możliwe wybicie 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 (3):

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

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.

Gęstość prądu emisji katody jest zależna również od nierówności jej powierzchni. Ziarna pyłów przemysłowych charakteryzują się dużą nierównomiernością powierzchni o dużych krzywiznach. Właściwości rodzaju i stanu powierzchni ziarn pyłu przemysłowego mają istotne znaczenie w kształtowaniu zmian rozkładu natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej izolacyjnego odstępu powietrznego oraz procesu wyzwalania elektronów i gęstości prądu emisji z powierzchni ziarn pyłów przemysłowych.

J o n i z a c j a z d e r z e n i o w a. 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 δ i prawdopodobieństwa jonizacji przy zderzeniach, co opisuje pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda α

$$\frac{\alpha}{p} = \frac{1}{\lambda}\exp\left(-\frac{E_j}{Eq\lambda}\right), \tag{4}$$

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

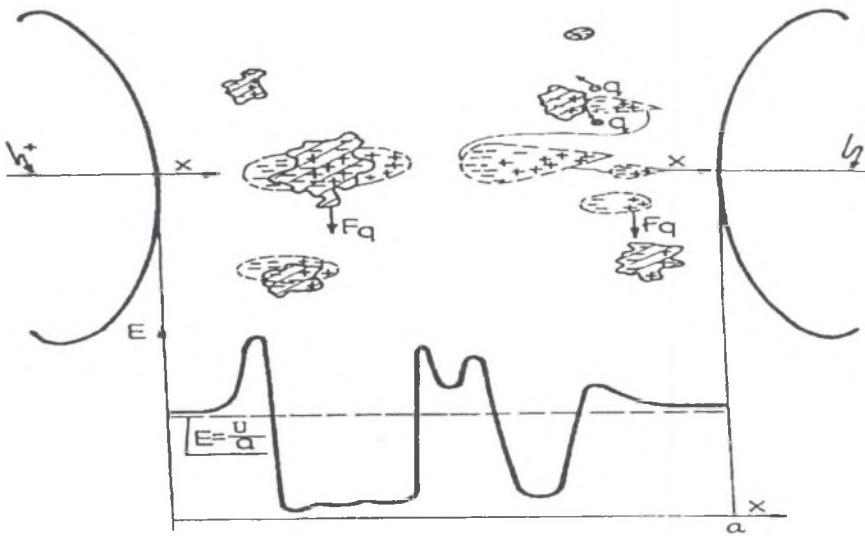
Wynika z tego, że jeżeli energia ładunku swobodnego na drodze swobodnej λ w polu elektrycznym o natężeniu E osiągnie wartość energii jonizacji cząsteczek powietrza w zadanej temperaturze, to może wystąpić jonizacja zderzeniowa i wówczas spełniona jest zależność:

---

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

$$Eq\lambda \geq E_j . \tag{5}$$

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 zilustrowano na rysunku 1.



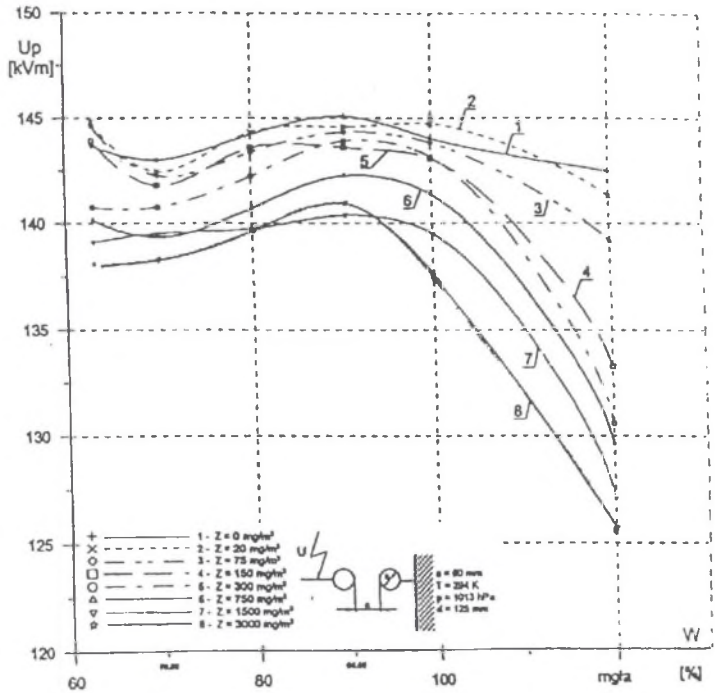
Rys. 1. Ilustracja wpływu ziarn pyłu przemysłowego na rozkład natężenia pola wzdłuż osi x pomiędzy elektrodami

Fig. 1. The illustration of the dust grains influence on distribution of the electrical field intensity

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 m^3 . Procedurę badań laboratoryjnych opisano w pracach [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 i koncentracji ziarn pyłu przemysłowego

Fig. 2. The influence of humidity and different concentration of dust grains on electrical strength of air

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 przy oparciu się na wynikach badań eksperymentalnych. Przeprowadzone badania, z których wybrane wyniki przedstawiono na rysunku 2, pozwalają na podanie następujących wniosków:

- Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego ziarnami pyłu przemysłowego w polu elektrycznym pierwotnie równomiernym w sposób istotny zależna jest 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 odstępu izolacyjnego uwidacznia się w pobliżu wilgotności nasycenia (mgła). Wówczas obniżenie wytrzymałości elektrycznej powietrza w stosunku do wytrzymałości normalnej może osiągnąć poziom od (0,95 ÷ 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 teoretycznych i eksperymentalnych, które pozwolą na opracowanie modeli matematycznych oceny wytrzymałości odstępów 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 odstępów izolacyjnych powietrznych. ZN Pol. Śląskiej, ser. „Elektryka", z.127, Gliwice 1992, 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, Gliwice 1995.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Bolesław Mazurek

Wpłynęło do Redakcji 15 kwietnia 2000 r.

Abstract

Insulating air gaps of electric equipment installed in industrial regions work in a quite different conditions that these ones in a clean air. A variable concentration of the dust grains and water particles in the electric field in insulating medium new conditions for ignition and development of electric discharges.

Main chemical and physical properties of constituents of the mixture of air and industrial dust grains are presented in the paper. The analysis of ionizing agents and influence of the dust grains on distribution of the electric field show their significant influence on ignition of electric discharges and electric strength of the mixture of air and dust grains.

Some results of investigations of influence of the dust grains on electric strength of the aerosol in fig. 2 show that electric strength of the insulating gap depends significantly on air humidity and a distance between electrodes.