ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: ELEKTRYKA z. 127 Nr kol. 1169

Alfred KAŁUŻNY

WPŁYW PYŁÓW PRZEMYSŁOWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNĄ ODSTĘPÓW IZOLACYJNYCH POWIETRZNYCH

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono metodę i wyniki badań wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnych w polu elektrycznym jednostajnym. Badania wykonano przy napięciu przemiennym 50 Hz dla różnego stężenia pyłu i zwiększonej wilgotności powietrza.

INFLUENCE OF INDUSTRIAL DUST ON THE ELECTRIC STRENGTH OF AIR GAPS

Summary. The paper presents results of laboratory tests on the electric strength of insulating air polluted gaps with uniform electric field at power frequency.

ВЛИЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЫЛИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Резюме. В статье представлены метод и результаты лабораторных измерений электрической прочности воздушных промежутков в однородном электрическом поле при загрязнении воздуха промышленной пылью. Исследования проводились при промышленной частоте электрического поля и изменяющейся влажности воздуха и концентрации пыли..

1. WSTĘP

Powietrzne układy elektroizolacyjne urządzeń przemysłowych i linii elektroenergetycznych pracują często w warunkach znacznego zanieczyszczenia atmosfery pyłami i gazami przemysłowymi oraz rozpylcną w powietrzu cieczą przewodzącą, np. wodą morską. Obecny stan wiedzy i przepisów normatywnych PN, IEC nie uwzględnia tak zmienionych warunków pracy odstępów izolacyjnych w ocenie ich możliwości eksploatacyjnych. Brak rozeznania tego problemu może prowadzić do znacznego błędu w ocenie wytrzymałości elektrycznej nie

tylko odstępów elektroizolacyjnych, ale również układów izolacyjnych uwarstwionych, np. izolator - powietrze otaczające. Przykładowo, wyniki badań terenowych izolatorów napowietrznych w warunkach zabrudzeń przemysłowych kwalifikowano często jako wyładowanie zabrudzeniowe, gdy tymczasem na powierzchni izolatorów nie było praktycznie warstwy zabrudzeń. Było to raczej wyładowanie elektryczne w powietrzu otaczającym izolator.

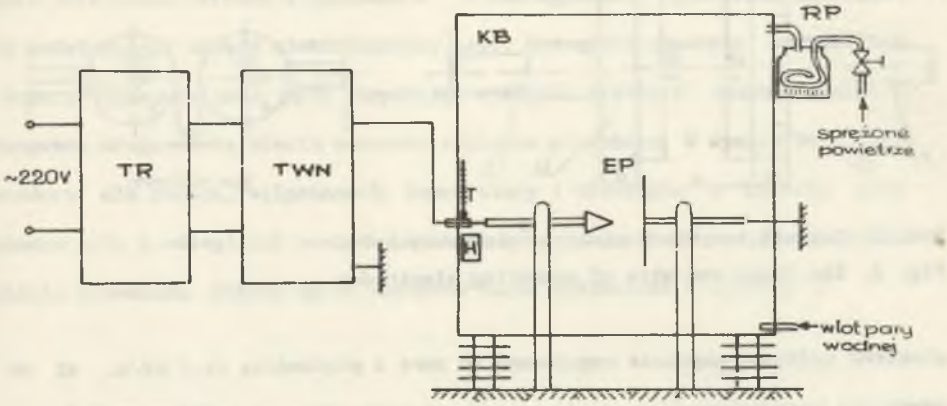
Z drugiej strony, brak rozeznania ww. zagadnień skłania służby projektowania i eksploatacji napowietrznych urządzeń elektrycznych do znacznego ich przewymiarowania, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu zużycia materiałów i kosztów produkcji oraz inwestycyjnych.

Opierając się na wynikach uzyskanych we wstępnych badaniach [1], analizie wyników badań zabrudzeniowych izolatorów na stacjach terenowych oraz rozważaniach mechanizmu zapłonu i rozwoju wyładowania elektrycznego w powietrzu, autor postawił tezę o istnieniu zależności wytrzymałości elektrycznej powietrza od stopnia jego zapylenia - zwłaszcza w warunkach zwiększonego zawilgocenia. Częściową próbę oceny ilościowej i jakościowej zagadnienia zawiera niniejsze opracowanie.

2. METODA BADAŃ

Pomiary wytrzymałości elektrycznej określonej poziomem napięcia przeskoku U_p wykonano napięciem przemiennym 50 Hz w układzie laboratoryjnym wg rys. 1.

Badany układ elektroizolacyjny zamodelowano tak, aby w przerwie iskrowej istniało pole jednorodne. Do badań przyjęto następujące układy elektrod: płaszczyzny równoległe i kule mimośrodkowe. Kształty i wymiary elektrod pokazano na rys. 2. Tak zamodelowany układ elektroizolacyjny umieszczono w komorze o objętości 1,2 m^3 wykonanej z pleksiglasu. W komorze badań rejestrowano temperaturę oraz wilgotność powietrza. Zmianę wilgotności w



Rys. 1. Schemat ideowy układu laboratoryjnego

TR - transformator regulacyjny 0-250 V, 10kVA,

TWN - transformator wysokiego napięcia, 0-150kV, 10kVA,

KB - komora badań, 1x1x1.2 m,

RP - rozpylacz pyłu,

EP - elektrody pomiarowe,

T - termometr,

H - hygrometr.

Fig. 1. The schematic diagram of a laboratory circuit.

TR - regulation transformer 0-250 V, 10kVA,

TWN - high voltage test transformer, 0-150kV, 10kVA,

KB - test chamber, 1x1x1.2 m,

RP - dust pulverizer,

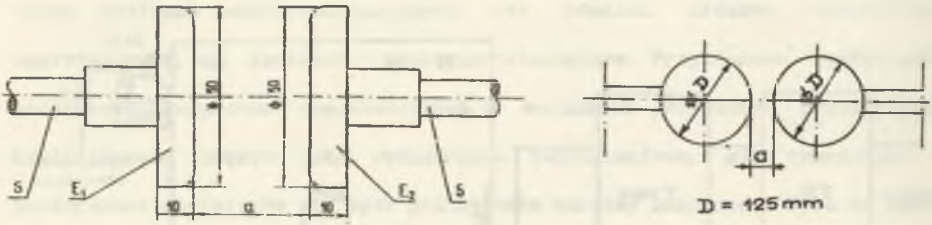
EP - measuring electrodes,

T - thermometer,

H - hygrometer.

komorze uzyskano przez doprowadzenie pary wodnej poprzez otwór w dolnej części komory. Zadane ilości pyłu wprowadzano do komory w postaci mieszaniny pyłu i powietrza, którą wytworzono w zbiorniku na zewnątrz komory. Wybrane własności pyłów - elektrownianego i hutniczego - zestawiono w tabl. 1.

Po wprowadzeniu zadanej masy pyłu do komory badań, uzyskano stężenie ziaren pyłu wyrażone w gramach na metr sześcienny. Następnie na układ



Rys. 2. Kształt i wymiary elektrod pomiarowych
Fig. 2. The shape and size of measuring electrodes

elektrod podawano napięcie regulowane od zera z prędkością ok. 1 kV/s, aż do uzyskania przeskoku.

Tablica 1

Wybrane własności pyłów przemysłowych

Rodzaj pyłu	Średnica zastępcza ziaren	Konduktywność składników rozpuszczalnych	Gęstość	Procentowa zawartość cząstek rozpuszczalnych
	μm	μS/m	t/m^3	%
Elektrowniany	40,6	180000	2,26	13,74
Hutniczy	29,3	117100	4,33	4,63

Po przeskoku napięcie po stronie pierwotnej zespołu probierczego obniżano do zera i po ponownym załączeniu transformatora probierczego zwiększano napięcie do przeskoku.

Biorąc pod uwagę losowy rozkład stężenia pyłu w komorze oraz opadanie ziaren pyłu, pomiary napięcia przeskoku wykonywano w dwóch seriach, dla

zadanego stężenia pyłu, po pięć pomiarów w serii. Po każdej serii pomiarów komora była przewietrzana i czyszczona - w szczególności powierzchnie elektrod modelowanego układu elektroizolacyjnego. Następnie ponownie wprowadzano do komory taką samą masę pyłu, uzyskując wymagane stężenie ziaren pyłu i wykonywano drugą serię pięciu pomiarów napięcia przeskoku. W wyniku przyjętej procedury, dla zadanej wilgotności, temperatury i ciśnienia w komorze oraz stężenia pyłu i odległości pomiędzy elektrodami, wykonano dziesięć pomiarów napięcia przeskoku. Zakres zmian warunków badań zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Zakres zmian parametrów stanu zanieczyszczenia powietrza

Wilgotność g/m^3	11,0	12,3	13,1	14,8	16,2	17,5	mgła
Średnie stężenie pyłu w powietrzu g/m^3	0,075	0,15	0,3	0,75	1,5	3,0	12,0

Odległość pomiędzy elektrodami zmieniano w zakresie:

- w układzie płaskim a = 10....25 mm,
- w układzie kul mimośrodkowych a = 10....65 mm.

Ciśnienie i temperatura powietrza podczas badań zmieniała się w niewielkim stopniu w stosunku do wartości normalnych (δ = 1,0).

3. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań są wypadkową oddziaływania szeregu, zmiennych losowo, parametrów stanu obiektu badanego oraz błędów systemowych i przypadkowych. W celu ograniczenia wpływu błędów pomiarowych na wyniki badań zastosowano wielokrotne powtarzanie pomiarów i obróbkę statystyczną wyników pomiaru.

Badania rozkładu wielkości mierzonej wykazały, że istnieje jednakowe prawdopodobieństwo odchyłek dodatnich i ujemnych, a rozkład wyników pomiarowych ma charakter rozkładu normalnego, przy czym dla zadanych warunków próby odpowiednie wartości średnie napięcia przeskoku i granice odchylenia standardowego wynoszą:

dla: $n = 5$ $\bar{U}_p = 27,72$ $0,7 \le \sigma \le 3,35$

$n = 10$ $\bar{U}_p = 28,01$ $0,37 \le \sigma \le 0,998$

$n = 50$ $\bar{U}_p = 28,10$ $0,195 \le \sigma \le 0,29$.

Wartość oczekiwaną oraz przedział ufności wyznaczono zgodnie z statystyką Studenta [2], wg zależności:

- wartość średnia arytmetyczna napięcia przeskoku wynosi:

$$\bar{U}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} U_{pi} \qquad (1)$$

- średnie odchylenie kwadratowe s wynosi:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (U_{pi} - \bar{U}_p)^2}{n-1} , \qquad (2)$$

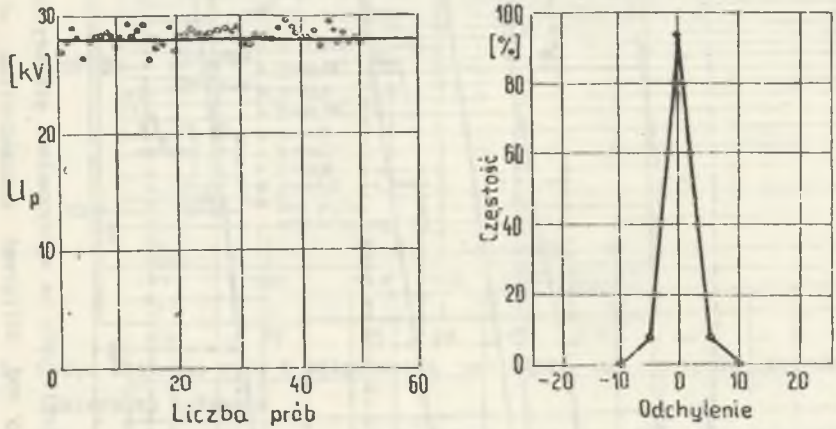
- dwustronne odchylenie od wartości średniej określające poziom ufności 0,95 wynosi:

$$\bar{U}_p - \frac{st}{\sqrt{n}} \le U_{pśr} \le \bar{U}_p - \frac{st}{\sqrt{n}} \qquad (3)$$

- odchylenie standardowe:

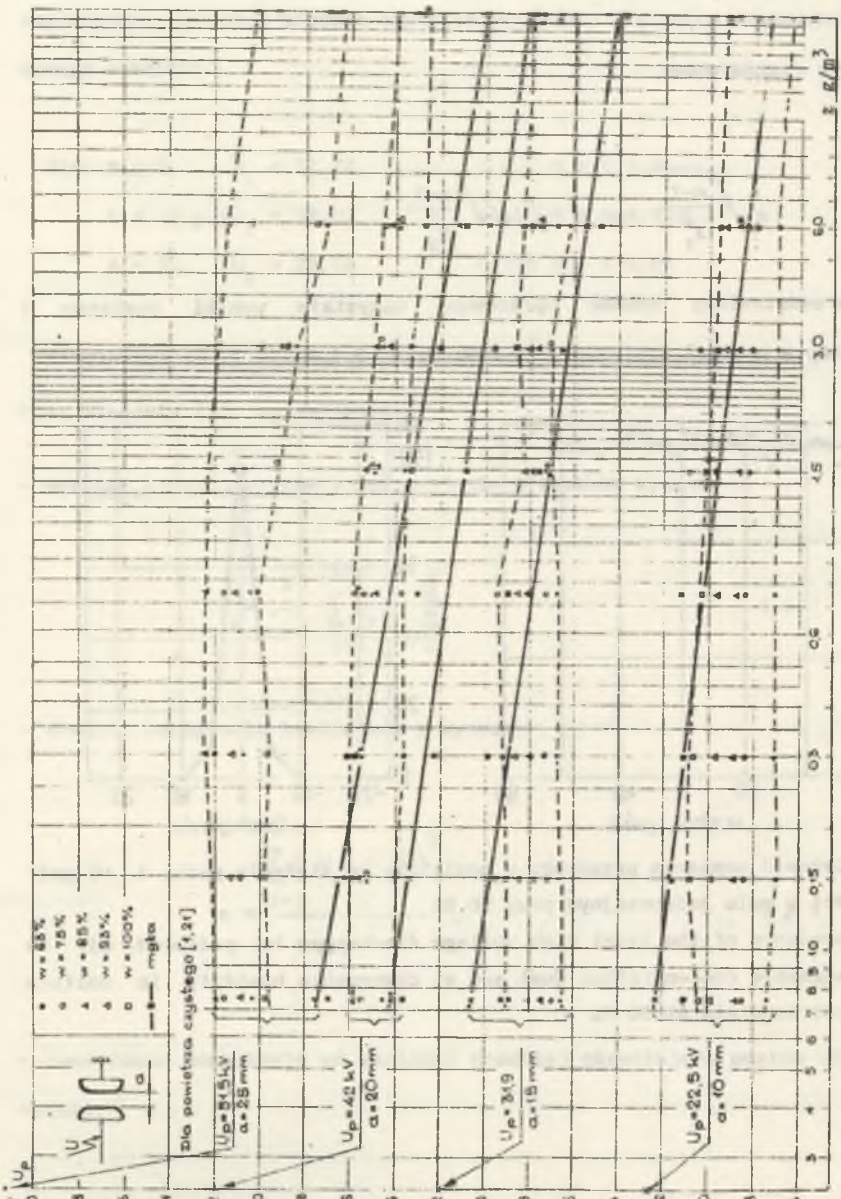
$$s\sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} \le \sigma \le s\sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \qquad (4)$$

W przedstawiony sposób opracowano wszystkie wyniki pomiarów i przedstawiono w postaci graficznej na rys. 3, 4, 5 i 6.



Rys. 3. Zależność napięcia przeskoku w powietrzu od stężenia pyłu i wilgotności w polu jednostajnym przy 50 Hz

Fig. 3. Dependence of the level high voltage discharges in polluted air by changeable concentration dust and at changeable humidity in uniform electric field at 50 Hz

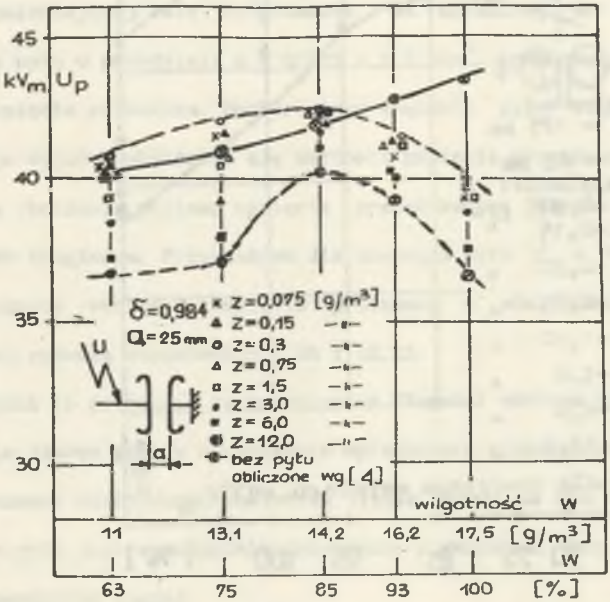


Rys. 4. Wpływ wilgotności i stężenia pyłu na wytrzymałość elektryczną odstępu izolacyjnego przy 50 Hz

Fig. 4. The influence of humidity and different concentration of dust on electrical strength of the insulating gap, at 50Hz

4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono graficznie. Podają one zależność napięcia przeskoku - wartość średnią oczekiwaną - w funkcji stężenia pyłu przemysłowego i wilgotności powietrza otaczającego. Ze względu na

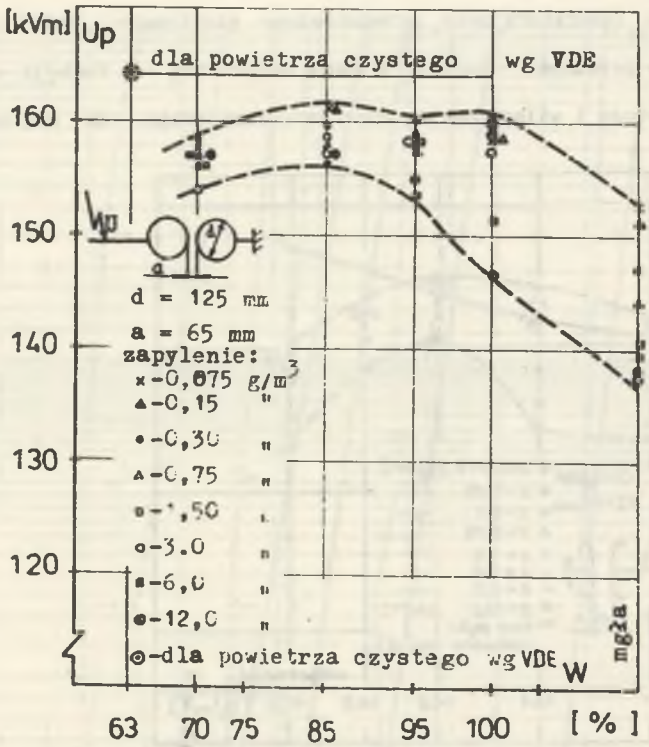


Rys. 5. Wpływ stężenia pyłu i wilgotności powietrza na napięcie przeskoku iskiernika kulowego

Fig. 5. The influence of concentration of dust and humidity on electrical strength of sphare spark gap

dużą liczbę pomiarów i aby zachować przejrzystość rysunków, nie podawano przedziałów ufności mierzonych wartości napięcia przeskoku.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki pomiarów napięcia przeskoku, w układzie elektrod płaskich, w funkcji stężenia pyłu (w g/m^3) przy zadanej wilgotności powietrza otaczającego. Dla warunków mgłowych (brak widoczności w powietrzu) zmianę napięcia przeskoku pomiędzy elektrodami w funkcji stężenia pyłu przedstawiono w postaci linii ciągłej, wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 6. Porównanie wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnych powietrza czystego i zanieczyszczonego pyłem przy 50Hz

Fig. 6. The comparison of the electric strength of insulating gaps in clean and polluted air, at 50 Hz

Wyniki pomiarów porównano z danymi literaturowymi dla powietrza czystego. Z uzyskanych rezultatów badań wynika, że dla małych odstępów izolacyjnych (a <15 mm) pył przemysłowy w przestrzeni międzyelektrodowej powoduje nieznaczne obniżanie poziomu napięcia przeskoku wraz ze wzrostem stężenia pyłu. Stopień obniżenia się napięcia przeskoku jest zależny od wilgotności powietrza. Dla stężenia pyłu w powietrzu mniejszego od 6 g/m^3 zwiększenie wilgotności, w stosunku do wilgotności normalnej, powoduje tylko nieznaczne obniżenie napię-

cia przeskoku. Dla stężenia pyłu większego od 6 g/m^3 wzrost wilgotności w powietrzu powoduje szybkie obniżenie poziomu napięcia przeskoku.

Ze wzrostem długości odstępu izolacyjnego rośnie różnica pomiędzy wytrzymałością elektryczną powietrza czystego i zanieczyszczonego pyłem przemysłowym.

Dla długości drogi wyładowania a = 20 i 25mm, w układzie elektrod płaskich i zmieniającej się wilgotności, od normalnej do nasycenia, wzrost stężenia pyłu w przedziale z = 0,075 ÷ 1,5 g/m^3 powodował nieznaczne obniżenie napięcia przeskoku. Dopiero przy stężeniu pyłu większym od 1.5 g/m^3 następuje wyraźne obniżenie się wartości napięcia przeskoku. Bardzo istotny wpływ na obniżenie poziomu napięcia przeskoku ma wzrost stężenia pyłu w powietrzu zamglonym. Przykładowo dla stężenia pyłu z = 0,075 g/m^3 i 0,75 g/m^3 różnice wartości napięcia przeskoku w odniesieniu do wilgotności normalnej wynoszą odpowiednio 7,3% i 12,2%.

Wyniki te pokazują, że ze wzrostem długości odstępu izolacyjnego rośnie znaczenie ziaren pyłu w mechanizmie wyładowania elektrycznego. Obniżanie się wytrzymałości elektycznej powietrza (linia ciągła na rys.3) wraz ze wzrostem stężenia pyłu jest szczególnie intensywne w warunkach dużej zawartości drobin wody w powietrzu (mgła).

Na rys. 4 i 5 zestawiono wyniki badań wytrzymałości elektrycznej powietrza o zadanym stężeniu pyłu z w funkcji wilgotności otoczenia. Z rysunków tych wynika, że zarówno w układzie elektrod płaskich, jak i kulowych, tworzących pole elektrycznie jednostajne, wartość napięcia przeskoku rośnie ze wzrostem wilgotności w zakresie od normalnej (63%) do 85%. Dalszy wzrost wilgotności (ponad 85%) powietrza zanieczyszczonego pyłem powoduje zmniejszenie wartości napięcia przeskoku. Wyniki te pokazują, że znana reguła wzrostu wytrzymałości elektrycznej ze wzrostem wilgotności w powietrzu czystym - w układzie elektrod o polu niejednostajnym - jest również słuszna dla odstępu izolacyjnego o polu jednostajnym w powietrzu zanieczyszczonym

pyłem przemysłowym w zakresie zmian wilgotności od normalnej do 85%. Dalszy wzrost liczby drobin wody w powietrzu zanieczyszczonym pyłem przemysłowym powoduje obniżenie się wartości napięcia przeskoku, z rosnącym współczynnikiem regresji.

Wyniki tych badań wykazały różnicę w stosunku do dotychczasowych poglądów na zależność wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnych powietrznych w polu elektrycznym jednostajnym, które nie uwzględniają wpływu stopnia zawilgocenia powietrza na wytrzymałość elektryczną. Pogląd ten, o ile jest słuszny dla powietrza czystego, to wydaje się, że nie może być przyjęty do analizy wytrzymałości elektrycznej powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym.

Porównanie danych literaturowych, dla powietrza czystego, z wnikami badań zawartymi w tym artykule przedstawiono na rys. 6. Z zestawienia tego wynika, że dla małych odstępów izolacyjnych (do 20 mm) zanieczyszczenie powietrza ziarnami pyłu przemysłowego powoduje wzrost ich wytrzymałości elektrycznej. Dla rosnącej drogi wyładowania elektrycznego (a > 20mm) wytrzymałość elektryczna maleje, w porównaniu do warunków normalnych, wraz ze wzrostem koncentracji ziaren pyłu i zawartości drobin wody w powietrzu.

5. WNIOSKI

1. Wyniki badań wpływu zanieczyszczenia powietrza pyłem przemysłowym na wytrzymałość elektryczną odstępów izolacyjnych o polu elektrycznym jednostjnym wskazują na istotną jej zależność od stopnia koncentracji ziaren pyłu i zawartości drobin wody w powietrzu.

2. Stopień obniżenia się wytrzymałości elektrycznej odstępu izolacyjnego w powietrzu zanieczyszczonym pyłem przemysłowym rośnie ze wzrostem wilgotności i długości drogi wyładowania.

3. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że dotychczasowy pogląd o

nieistotnym wpływie wilgotności powietrza na wytrzymałość elektryczną odstępów izolacyjnych o polu elektrycznym jednostajnym nie jest chyba słuszny w przypadku warunków rzeczywistych, w których pracują techniczne układy elektroizolacyjne.

4. Konieczne są dalsze badania mające na celu wyjaśnienie wpływu pyłu przemysłowego na wytrzymałość elektryczną odstępów izolacyjnych powietrznych o polu jednostajnym i niejednostajnym oraz dłuższej drodze wyładowania przy oddziaływaniu napięcia statycznego i udarowego.

LITERATURA

1. Kałużny A.: Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym. Mat. Konf. Nauk. Urządzenia Elektroenergetyczne - Izolacja linii i stacji w.n., Bielsko Biała 1983.
2. PN -75/E-04060 Próby napięciem przemiennym.
3. Ganger B.: Der elektrische Durschlag von Gasen. Springer Verlag, Berlin 1953.
4. Szpor S., i in.: Technika wysokich wapięć. WNT, Warszawa 1978.
5. Sirotinski L.I., i in.: Technika wysokich napięć. t. 1, PWT Warszawa 1954.
6. Lesch G.: Lehrbuch der Hochspannungstechnik. VEB, 1966.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Eugeniusz Wasilenko

Wpłynęło do redakcji dnia 21 stycznia 1992 r.

INFLUENCE OF INDUSTRIAL DUST ON THE ELECTRIC STRENGTH OF AIR GAPS

A b s t r a c t

The overhead lines and substations high voltage equipment located in industrial polluted areas are exposed to the considerable density of industrial dust. So far research and utilization works, together with

standard requirements that have been used, do not comprise the influence of air pollution on its electric strength.

The author set forward thesis that industrial air pollution creates new conditions for the ignition and development of electric discharges in the air, in comparison with normal conditions.

The paper presents method and results of laboratory tests carried out to check the influence of industrial dust upon the electric strength of short insulating air polluted gaps with uniform electric field at power frequency.