

Alfred KAŁUŻNY

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

WPLYW ŁUKÓW CZĄSTKOWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ POWIERZCHNIOWĄ UKŁADU ELEKTROIZOLACYJNEGO

Streszczenie. W opracowaniu przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wpływu wyładowań cząstkowych (łuków wędrownych) na wytrzymałość elektryczną powierzchniową układu elektroizolacyjnego - w części niezobocznikowanej łukiem cząstkowym. Badania wykonano napięciem przemiennym 50 Hz, dla pionowego i poziomego położenia roboczego układu elektroizolacyjnego. Układ elektroizolacyjny stanowiła rura z porcelany elektrotechnicznej o średnicy zewnętrznej 71 mm, na którą nałożono elektrody o dużej i małej krzywiznie brzegowej. Drogę przeskołu badanego układu elektroizolacyjnego zmieniano w zakresie 50 - 120 mm. Długość drogi zobocznikowanej łukiem cząstkowym zmieniano w zakresie 5 - 35 mm.

Wyniki pomiarów wskazują na dużą zależność wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej badanego układu elektroizolacyjnego od długości łuku cząstkowego.

1. Wprowadzenie

Układy elektroizolacyjne napowietrzne eksploatowane na terenach o zanieczyszczonej atmosferze są narażone na wystąpienie wyładowań niezupełnych powierzchniowych. Wyładowanie zabrudzeniowe niezupełne posiada charakter silnoprądowy [2,3] w postaci łuków cząstkowych (wędrujących). Ze względu na nieliniowy rozkład napięcia osiowego wzdłuż izolatora długościowego lub łańcucha izolatorów kołpakowych oraz zmienną rezystancję powierzchniową izolatora wzdłuż drogi upływu, łuki cząstkowe zapalają się, zależnie od poziomu napięcia na izolatorze, na odcinkach o dużej rezystancji powierzchniowej. W warunkach sieciowych (sieć sztywna) łuki cząstkowe palą się w stosunkowo długim przedziale czasu (kilkadziesiąt sekund). W tym czasie na izolatorze zapalają się mogą dalsze łuki cząstkowe i łączy się w łuk kaskadowy, który zawiąza już znaczną część drogi przeskołu po powierzchni izolatora. Nasuwa się więc pytanie, w jakim stopniu łuk cząstkowy wpływa na wytrzymałość elektryczną pozostałej części, niezobocznikowanej łukiem cząstkowym, drogi przeskołu izolatora zależnie od długości łuku cząstkowego i położenia pracy izolatora.

Badania modelowe Crona [1] w warunkach umożliwiających szybkie przemierzanie się stopy łuku wykazały znaczny wpływ łuku cząstkowego na wytrzy-

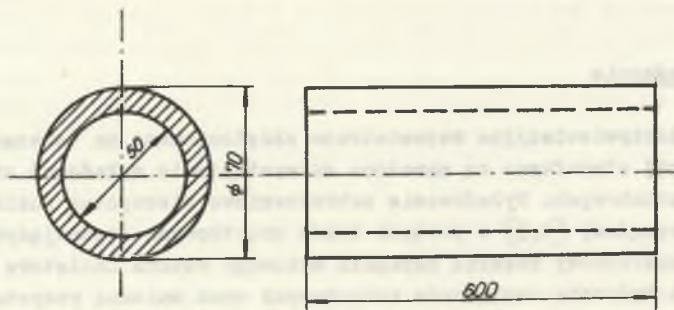
małość elektryczną powierzchniową. W opracowaniu przedstawiono wyniki badań wpływu wyładowań łukowych - cząstkowych - na wytrzymałość elektryczną w przypadku ograniczenia możliwości przemieszczania się stopy łuku wzdłuż drogi upływu izolatora. Stanowi to dalszy przyczynek dla wyjaśnienia wpływu łuku cząstkowego na wyznaczenie minimalnego poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatorów.

2. Metodyka badań

Badania laboratoryjne wpływu łuków cząstkowych na wytrzymałość elektryczną powierzchniową układu elektroizolacyjnego wykonano napięciem przemianowym o częstotliwości 50 Hz wg niżej opisanych zasad.

2.1. Opis układu elektroizolacyjnego przyjętego do badań

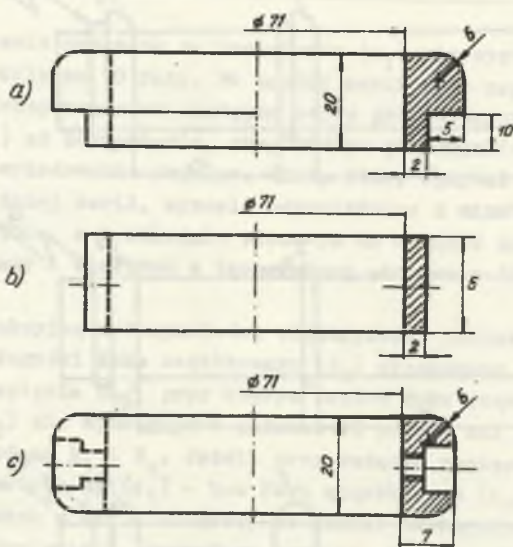
Układ elektroizolacyjny wykonano w następujący sposób. Część izolacyjną stanowiła rura ceramiczna z porcelany elektrotechnicznej pokryta szkliwem na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej, pokazana na rys. 1. Średnica części izolacyjnej była dostosowana do średnicy pnia izolatorów długopniowych. Elektrody pomiarowe, których kształt i wymiary pokazano na rys. 2, były wykonane z mosiądzu, a powierzchnia ich była pokryta galwanicznie warstwą niklu.



Rys. 1. Rura izolacyjna z porcelany elektrotechnicznej

Fig. 1. Insulation tube of electrical porcelain

Sposób przygotowania układu elektroizolacyjnego do badań pokazano na rys. 3. Wytrzymałość elektryczną mierzono na odstępie (a_1) między elektrodami E_1 i E_0 , który modeluje przerwę izolacyjną nie zbocznikowaną łukiem cząstkowym (po zapłonie wyładowania zabrudzeniowego). Odstęp izolacyjny (a_2) stanowi przerwę, na której wymuszono zapłon łuku elektrycznego, który modeluje łuk cząstkowy - po zapłonie wyładowania zabrudzeniowego. Elektrody napięciowe odstępów izolacyjnych (a_1) i (a_2) zasilane były w układzie laboratoryjnym wysokiego napięcia (rys. 4) włączonym do jednej fazy sieci zasilającej.



Rys. 2. Kształt i wymiary elektrod pomiarowych
Fig. 2. Shape and dimensions of measuring electrodes

2.2. Układ laboratoryjny

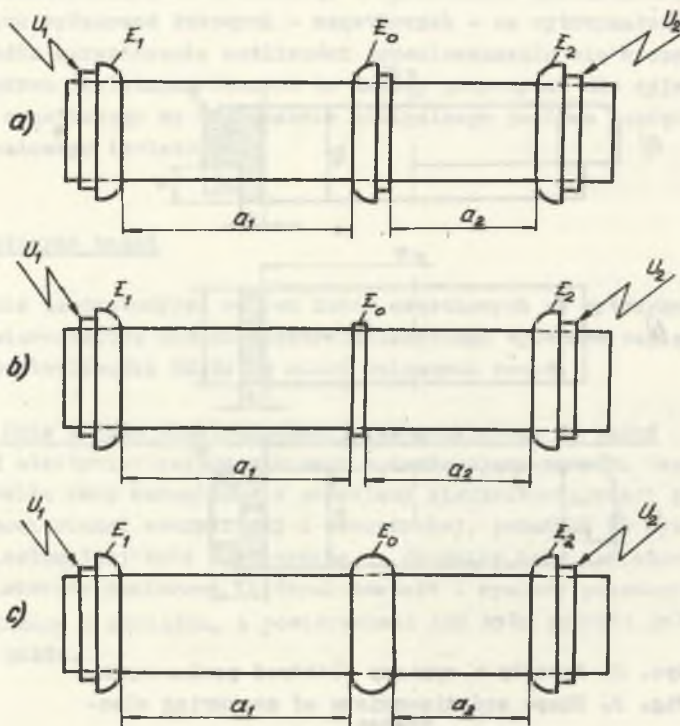
Schemat ideowy i podstawowe dane techniczne układu laboratoryjnego przedstawiono na rys. 4.

Napięcie pomiarowe układu laboratoryjnego wyznaczono korzystając z przekładni napięciowej transformatora próbierczego w.n.n.

2.3. Sposób wykonania pomiarów

Po przygotowaniu układu laboratoryjnego i obiektu badanego wykonano pomiary parametrów otaczającego powietrza: ciśnienia, temperatury i wilgotności względnej. Następnie dla zadanej odległości (a_1) badanego odstępu izolacyjnego pomierzono napięcie przeskoku (seria 10 pomiarów) wg normy [4]. Odstęp izolacyjny (a_1) - pomiędzy elektrodami E_1 i E_0 - zmieniano w zakresie: $a_1 = 50, 80$ i 120 mm.

Badanie wpływu wyładowania cząstkowego (a_2) na wytrzymałość elektryczną odstępu izolacyjnego (a_1) przeprowadzono w następujący sposób.



Rys. 3. Badane układy elektroizolacyjne

- a) układ z niesymetryczną elektrodą uziemioną o dużej i małej krzywiznie brzegowej,
 b) układ z elektrodą paskową,
 c) układ z symetryczną elektrodą uziemioną o małej krzywiznie brzegowej,
 d) układ wg c), pracujący w położeniu pionowym

Fig. 3. The tested electro-insulating systems

- a) system with an asymmetrical earth electrical of small and big boundary curvature,
 b) system with a band electrode,
 c) system with a symmetrical earth electrode of a small boundary curvature,
 d) system according to c), working in vertical position

Do odstępów izolacyjnych (a_1) przykładano napięcie U_1 , a następnie włączano napięcie U_2 o minimalnej uprzednio określonej wartości, która powoduje zapłon łuku elektrycznego na odstępie izolacyjnym (a_2) - pomiędzy elektrodami E_2 i E_0 . Po zapłonie łuku (a_2) przy załączonym napięciu U_1 obserwowano układ elektroizolacyjny podczas równoczesnego działania pola elektrycznego na a_1 i palącego się łuku na a_2 przez czas 1 min w położeniu poziomym izolatora i 15 s w położeniu pionowym¹⁾.

¹⁾ Przyczyną, która wymusiła skrócenie czasu oddziaływania łuku (a_2) izolator, było silne nagrzewanie się elektrod i lokalnie materiału izolacyjnego, co powodowało pęknięcie rury ceramicznej.

Jeżeli w tym czasie przeskok na izolatorze (a_1) nie wystąpił, to próbę przeprowadzono kolejno 10 razy. Po każdej serii prób napięcie U_1 obniżono o $U = 500$ V i przeprowadzono następną serię prób wytrzymałości elektrycznej odstępów (a_1) aż do napięcia, przy którym przynajmniej w jednej próbie z 10 wystąpiło wyładowanie zupełne. Czas, który upływał pomiędzy kolejnymi pomiarami w danej serii, wynosił odpowiednio: 2 minuty dla położenia poziomego izolatora, a w układzie pionowym do momentu wyrównania się temperatury porcelany i elektrod z temperaturą otoczenia (kilka do kilkunastu minut).

Zależność funkcyjną wytrzymałości elektrycznej izolatora odstępów elektrod (a_1) od długości łuku cząstkowego (a_2) wyznaczono, określając najwyższy poziom napięcia U_{1p} , przy którym zapłon łuku cząstkowego o określonej długości (a_2) nie spowoduje - podczas 10 prób - ani jednego przeskoku pomiędzy elektrodami E_1 i E_0 . Jeżeli przy zadanym napięciu U_1 , mniejszym od napięcia przeskoku na (a_1) - bez łuku cząstkowego (a_2), wystąpił chociaż jeden przeskok w serii 10 prób, to pomiar powtarzano i ewentualnie dalej obniżano napięcie U_1 prowadząc pomiary aż do uzyskania 10 negatywnych (bez przeskoku) prób. Napięcie to uznano za największe napięcie wytrzymywane odstępów izolacyjnego (a_1) izolatora przy zadanej długości łuku cząstkowego (a_2) i oznaczono U_{p1}^* .

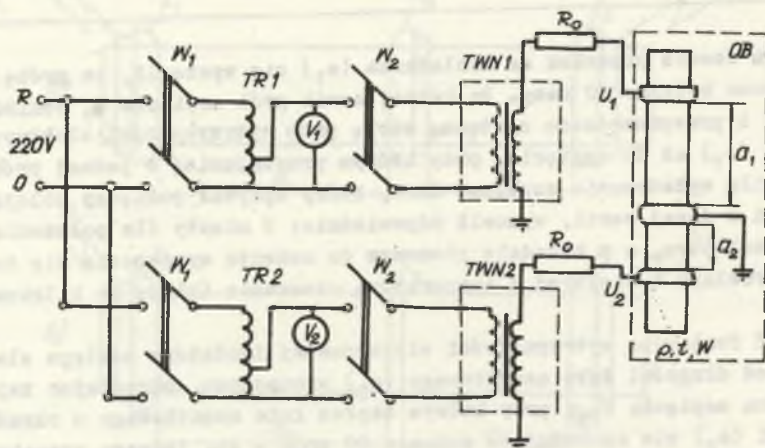
3. Wyniki badań

Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej izolatora o odstępach elektrod (a_1) z równoczesnym oddziaływaniem łuku cząstkowego o długości (a_2) opracowano zgodnie z postanowieniami normy PN-75/E-04060 [4] i zestawiono w tablicy 1. Średni poziom napięcia przeskoku U_{p1} (bez łuku cząstkowego) wyznaczono z zależności:

$$\bar{U}_{p1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{pi} \quad (1)$$

Średnie odchylenie kwadratowe S wyznaczono ze wzoru:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{pi} - \bar{U}_{p1})^2}{n - 1}} \quad (2)$$



Rys. 4. Schemat ideowy układu laboratoryjnego
gdzie:

- W_1, W_2 - wyłączniki sieciowe nożowe,
- TR1 - transformator regulacyjny
- $U_2 = 0 \div 230$ V, $S = 2,5$ kVA,
- TR2 - transformator regulacyjny
- $U_2 = 5 \div 230$ V, $S = 10$ kVA,
- TWN - transformator wysokiego napięcia, TP-110,
 $V = 110000/220$, moc ciągła $S = 10$ kVA,
- TWN2 - transformator wysokiego napięcia, TP-60,
 $V = 60000/220$, moc ciągła $S = 1000$ VA
- R_0 - rezystor ochronny,
- OB - obiekt badań,
- V_1, V_2 - woltomierze laboratoryjne kl. 0,5

Fig. 4. Diagram of the laboratory circuit structure
where:

- W_1, W_2 - knife switches,
- TR1 - voltage regulating transformer, $U_2=0-230$ V, $S=2,5$ kVA,
- TR2 - voltage regulating transformer, $U_2=5-230$ V, $S=10$ kVA,
- TWN1 - high-voltage test transformer, TP-110,
 $\varphi = 110000/220$, $S = 10$ kVA,
- TWN2 - high-voltage test transformer, TP-60,
 $\varphi = 60000/220$, $S = 1000$ VA,
- R_0 - protective resistor,
- OB - object of the experiment,
- V_1, V_2 - the class 0,5 voltmeter

Granice 95-procentowego przedziału ufności rzeczywistej wartości średniej napięcia przeskoku U_{p1} oraz odchylenia standardowego σ wyznaczono wg zależności:

$$\bar{U}_{p1} - \frac{st}{\sqrt{n}} \leq U_{\text{sr}} \leq \bar{U}_{p1} + \frac{st}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

oraz

$$s \sqrt{\frac{n-1}{x_1^2}} \leq \sigma \leq s \sqrt{\frac{n-1}{x_2^2}} \quad (4)$$

Opracowane wyniki badań przedstawiono graficznie na rys. 5,6,7,8.

4. Omówienie wyników badań

4.1. Ocena zależności ilościowych

Wykonane pomiary wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej układu elektroizolacyjnego z szeregowo palącym się łukiem cząstkowym o długości (a_2) pokazują, że zapłon łuku cząstkowego (szeregowego) wpływa wyraźnie na obniżenie się wytrzymałości elektrycznej statycznej odstępów izolacyjnego (a_1). Analizując wyniki pomiarów pokazane na rys. 5,6,7 i 8, można powiedzieć, że dla poziomego położenia pracy układu elektroizolacyjnego charakter jakościowej zmiany wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnego (a_1); w małym stopniu zależny jest od ukształtowania elektrody uzziemionej.

Natomiast wyraźny jest wpływ kształtu elektrod (determinujący warunki palenia się i przemieszczania stopy łuku cząstkowego) na zmianę poziomu wytrzymałości elektrycznej odstępów izolacyjnego (a_1).

Charakterystyki opisujące zależność poziomu napięcia przeskoku na drodze (a_1) - badany odstęp izolacyjny - od długości łuku cząstkowego a_2 , pokazują, że w początkowym okresie wzrostu długości łuku cząstkowego napięcie przeskoku U_{p1} szybko maleje, by następnie przejść do stanu powolnego obniżania się i ustalenia się na określonym poziomie minimalnym niezależnym od długości łuku (a_2). W układzie poziomym pracy układu elektroizolacyjnego, z różnym rodzajem elektrod (rys. 3), minimalny poziom napięcia przeskoku U_{p1} na stałym odstępie izolacyjnym (a_1) ustala się, przy stosunku długości łuku cząstkowego (a_2) do długości odstępów (a_1), w przedziale $\frac{a_2}{a_1} 0,3 \pm 0,45$.

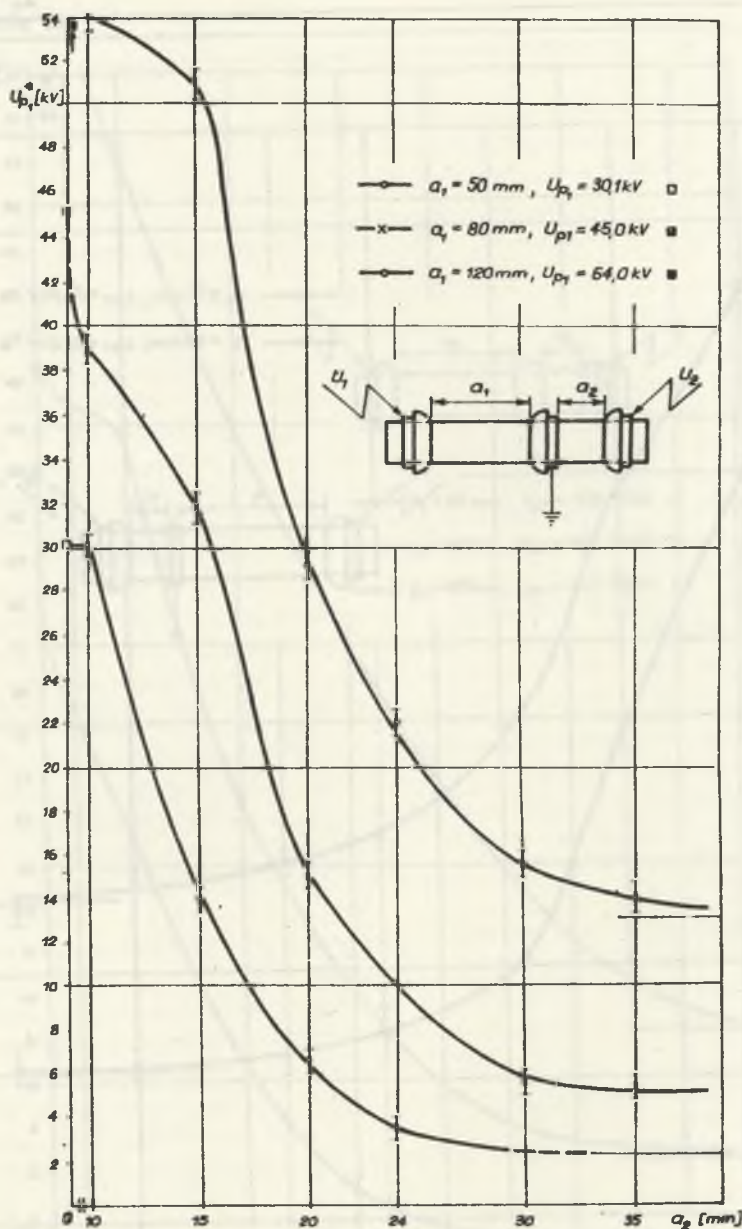
Tablica 1

Zestawienie wyników pomiarowych¹⁾

Lp	a_1, a_2 mm		U_{p1}	ϵ kV	U_{p1}^*	p kPa	ν K	η %	Rodzaj układu elektroizolacyjnego
	50	5	30,1	-	30,1	100,6	297	90	
		10			30,1				
		15			14,0				
		20			6,5				
		24			3,5				
80	10	45,0	0,09	39,0	100,8	294	86		
	15		37,0						
	20		19,0						
	24		13,0						
	30		5,5						
120	10	64,8	0,32	54,0	100,6	293	90		
	15		51,0						
	20		23,0						
	24		22,0						
	30		15,0						
	50	5	30,8	-	30,8	101,0	298	85	
		10			19,5				
		15			9,5				
		20			8,5				
		24			6,5				
80	5	42,6	0,13	37,0	100,9	294	83		
	10		29,5						
	20		15,5						
	24		14,5						
	30		12,5						
50	10	30,5	0,36	21,5	100,8	294	90		
	15		11,0						
	20		5,0						
	24		3,0						
	80		10	43,1				0,32	39,0
15		22,5							
20		19,0							
24		9,0							
30		7,0							
120	5	64,0	0,46	56,0	100,5	295	90		
	10		50,0						
	15		40,0						
	24		27,0						
	30		16,5						
50	10	32,2	0,36	25,5	100,9	295	75		
	15		32,2						
	20		32,2						
	24		25,5						
	30		19,5						
80	10	44,5	0,06	39,0	100,9	294	80		
	15		40,0						
	20		30,0						
	24		30,0						
	30		30,5						
100	10	61,1	0,19	57,5	100,9	295	88		
	30		42,5						
			0,52	43,0					

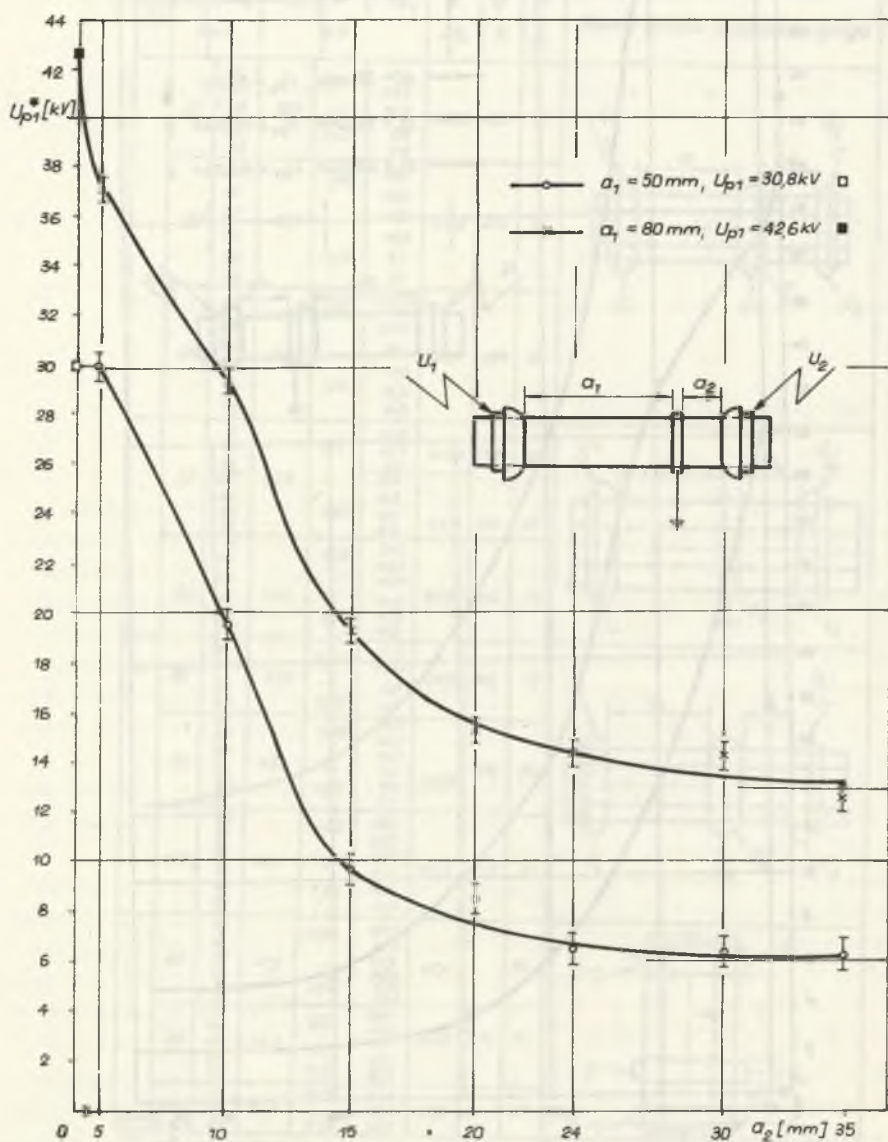
¹⁾ U_{p1}^* - przeliczono na warunki normalne

 U_{p1} - napięcie przeskoku bez łuku cząstkowego



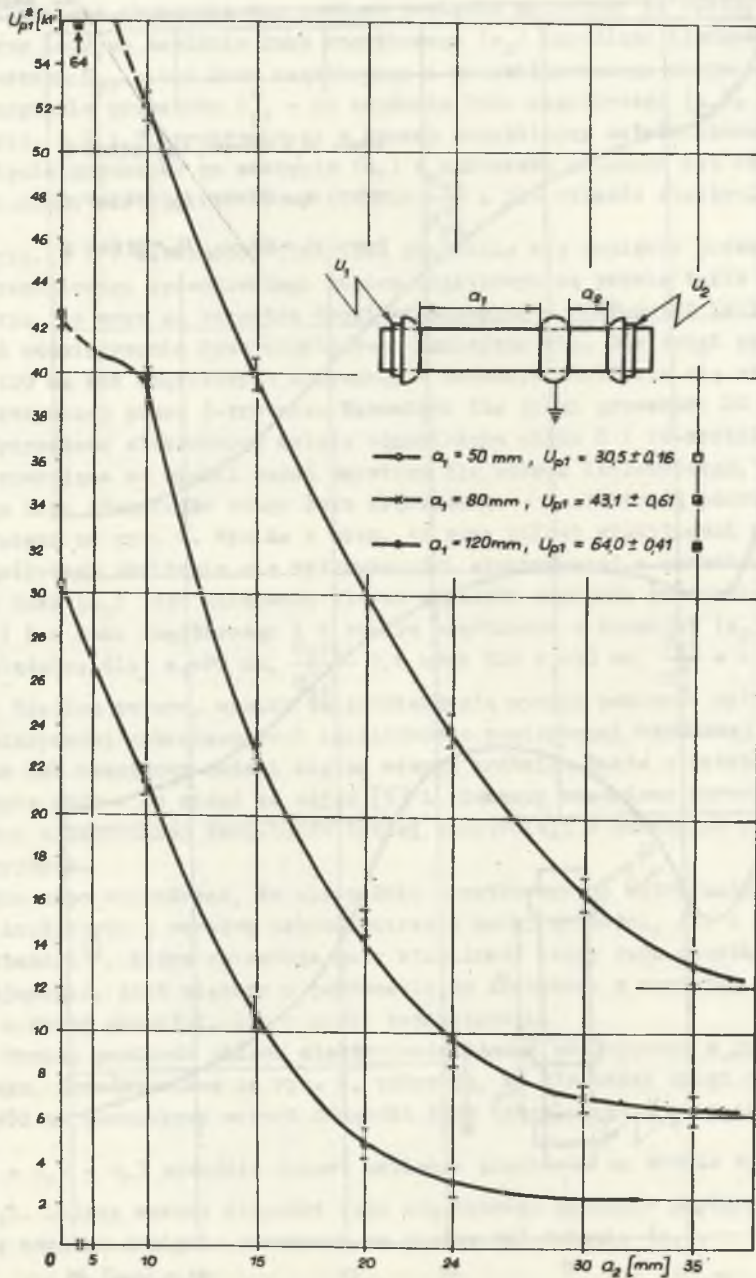
Rys. 5. Zależność wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej układu elektroizolacyjnego wg rys. 3a, pracującego w położeniu poziomym, o od długości łuku cząstkowego

Fig. 5. The dependence of the surface electric strength of electro-insulating system according to Fig. 3a, on the length of shunted particle arc



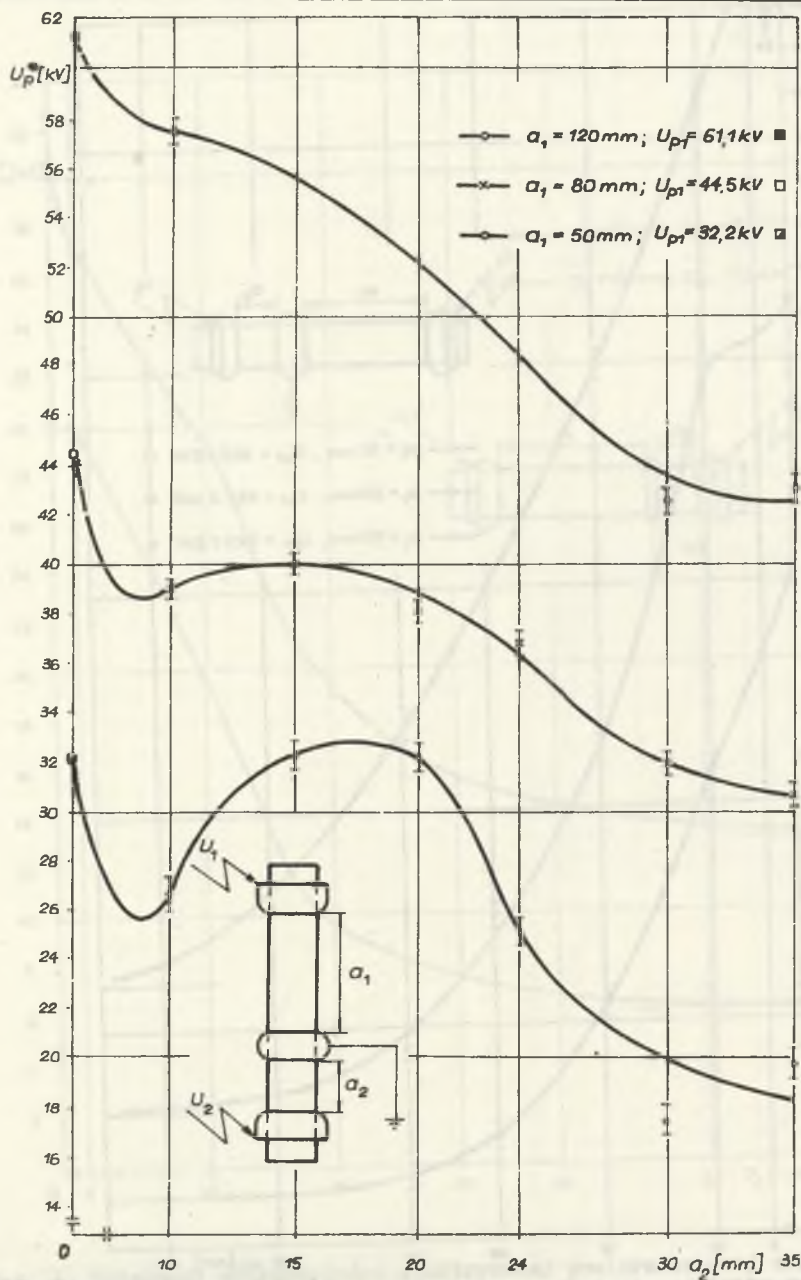
Rys. 6. Zależność wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej układu elektroizolacyjnego wg rys. 3b, pracującego w położeniu poziomym, od długości łuku cząstkowego

Fig. 6. The dependence of the surface electric strength of electro-insulating system according to Fig. 3b, on the length of shunted particle arc



Rys. 7. Zależność wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej układu elektroizolacyjnego wg rys. 3c, pracującego w położeniu poziomym, od długości łukcząstkowego

Fig. 7. The dependence of the surface electric strength of electro-insulating system according to Fig. 3c, on the length of shunted particle arc



Rys. 8. Zależność wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej układu elektroizolacyjnego wg rys. 3c, pracującego w położeniu pionowym, od długości łuku oszatkowego

Fig. 8. The dependence of the surface electric strength of electro-insulating system according to Fig. 3d, on the length of shunted particle arc

Ilościowe obniżenie się poziomu napięcia przeskoku na odstępie izolacyjnym (a_1) po zapłonie łuku cząstkowego (a_2) określono ilorazem napięcia przeskoku U_{p1} - bez łuku cząstkowego i ustabilizowanego minimalnego poziomu napięcia przeskoku U_{p1}^* - po zapłonie łuku cząstkowego (a_2).

Na rys. 5, 6 i 7 aproksymowano w sposób przybliżony ustabilizowany poziom napięcia przeskoku na odstępie (a_1) w warunkach palącego się łuku (a_2) i naniesiono wartości liczbowe ilorazu $\frac{U_{p1}}{U_{p1}^*}$. Dla układów elektroizolacyjnych

wg rys. 5 i 7 zależności ilościowe obniżania się napięcia przeskoku powierzchniowego spowodowanego łukiem cząstkowym są prawie takie same i wykazują, że wraz ze wzrostem drogi wyładowania a_1 (długości izolatora) stopień oddziaływania łuku cząstkowego zmniejsza się. Dla drogi przeskoku $a_1=120$ mm łuk cząstkowy - szeregowy - powoduje obniżenie się wytrzymałości elektrycznej ponad 5-krotnie. Natomiast dla drogi przeskoku 80 mm i 50 mm wytrzymałość elektryczna maleje odpowiednio około 8 i 10-krotnie.

Interesujące są wyniki badań uzyskane dla układu izolacyjnego, wymuszającego dużą stabilność stopy łuku cząstkowego - z elektrodą paskową - które pokazano na rys. 6. Wynika z nich, że przy silnej stabilności stopy łuku cząstkowego obniżenie się wytrzymałości elektrycznej w warunkach palącego się łuku (a_2) jest mniejsze. Iloraz wartości napięcia przeskoku na drodze (a_1) bez łuku cząstkowego i z łukiem cząstkowym o długości (a_2) wynosi odpowiednio; dla: $a_1=80$ mm, $\frac{U_{p1}}{U_{p1}^*} = 3,6$ oraz dla $a_1=50$ mm, $\frac{U_{p1}}{U_{p1}^*} = 4,6$.

Zdaniem autora, wyniki te potwierdzają wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej izolatorów o powierzchni schodkowej, dla których łuk cząstkowy dzieli się na szereg krótkich łuków o ustabilizowanej stopie łuku - co widać ze zdjęć [5] i tłumaczy częściowo wzrost wytrzymałości elektrycznej izolatorów takiej konstrukcji w warunkach prób laboratoryjnych.

Można więc wnioskować, że wpływ łuku cząstkowego na wytrzymałość elektryczną izolatorów z warstwą zabrudzeniową o małej grubości, ale o dużej konduktancji¹⁾, która spowoduje małą stabilność stopy łuku cząstkowego (wędrującego), jest większy w porównaniu do izolatora z warstwą zabrudzeniową o dużej grubości, ale o małej konduktancji.

Wyniki pomiarów układu elektroizolacyjnego pracującego w położeniu pionowym, przedstawione na rys. 8, pokazują, że dla małej drogi wyładowania $a_1=50$ mm początkowy wzrost długości łuku cząstkowego (a_2) w zakresie $\frac{a_2}{a_1} = 0,2 - 0,3$ powoduje wzrost napięcia przeskoku na drodze wyładowania (a_1). Dalszy wzrost długości łuku cząstkowego powoduje szybkie obniżanie się poziomu napięcia przeskoku na drodze wyładowania (a_1).

¹⁾ Zabrudzenia od zakładów chemicznych, bryza morska i mżawka z chłodni kominowych.

Dla rosnącej drogi wyładowania $a_1 \geq 80$ mm charakterystyczny wzrost poziomu napięcia przeskoku ze wzrostem długości łuku cząstkowego nie występuje. Poziom napięcia przeskoku badanego układu elektroizolacyjnego (a_1) ustala się przy długości łuku cząstkowego w stosunku do drogi przeskoku równym $\frac{a_2}{a_1} = 0,3 - 0,7$; z tym że dla małej drogi wyładowania - iloraz ten jest większy.

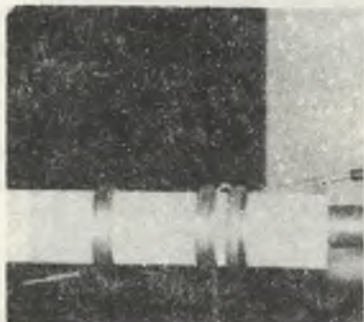
Ustalony poziom wytrzymałości elektrycznej tego samego układu elektroizolacyjnego (wg rys. 3c) pracującego w położeniu pionowym U_{p1}^* jest znacznie wyższy niż w położeniu poziomym odpowiednio: dla $a=50$ mm

$$\frac{U_{p1}^*}{U_{p-}^*} = 6,6; \quad a=80 \text{ mm}, \quad \frac{U_{p1}^*}{U_{p-}^*} = 4,4 \quad \text{i} \quad a=120 \text{ mm}, \quad \frac{U_{p1}^*}{U_{p-}^*} = 3,4.$$

Wynika z tego, że wpływ łuku cząstkowego (szeregowego), w układzie izolacyjnym pracującym w położeniu pionowym, na wytrzymałość powierzchniową sąsiadującej przerwy izolacyjnej jest o wiele mniejszy niż w położeniu poziomym.

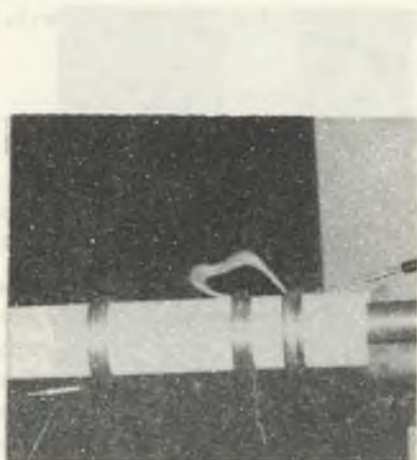
4.2. Analiza obserwacji zjawisk fizycznych

Wykorzystane do badań układy elektroizolacyjne pokazane na rys. 3a,b,c w położeniu poziomym i c w położeniu pionowym pozwoliły na zaobserwowanie interesujących zjawisk fizycznych. W układzie badanym wg rys. 3a, jak pokazano na fotografii (rys. 9), położenie stopy małego łuku cząstkowego ($a_2 < 20$ mm) jest ustabilizowane na krawędzi elektrody uziemionej o dużej krzywiznie. Wzrost długości łuku cząstkowego ($a_2 > 20$) powoduje przemieszczenie się stopy łuku - na elektrodzie uziemionej - na wewnętrzną stronę odstępu badanego i wydłużenie się chorągwi łuku w kierunku elektrody będącej na potencjale wysokiego napięcia - patrz fot. rys. 10 i 11. W wyniku tego znaczna część odstępu w powietrzu pomiędzy elektrodami E_1 i E_0 jest zbocznikowane kanałem zjonizowanego powietrza (chorągiew łuku a_2). Podczas badań łuk cząstkowy (a_2) zapalał się w różnym miejscu na powierzchni elektrod i wędrując (rys. 11) po obwodzie izolatora ustalał się w jego górnym położeniu. Wytrzymałość elektryczną odstępu (a_1) określono przez minimalny poziom napięcia, przy którym wyładowanie nie wystąpi - przy równoczesnym oddziaływaniu łuku cząstkowego (a_2) w czasie 1 min. W tym czasie łuk elektryczny (a_2) powoduje zmiany stanu cieplnego elektrod E_0 i E_2 oraz lokalnie w pobliżu stopy łuku materiału izolacyjnego (porcelany). W układzie izolacyjnym poziomym praktycznie dla wszystkich trzech rodzajów elektrod stopa łuku cząstkowego (a_2) i jego chorągiew nie przylegają ściśle do powierzchni materiału izolacyjnego. Więc lokalna temperatura materiału izolacyjnego nie wzrasta gwałtownie i materia może pracować podczas wielokrotnie powtarzanej próby 1-minutowej, nie powodując pęknięcia szkliva i porcelany.



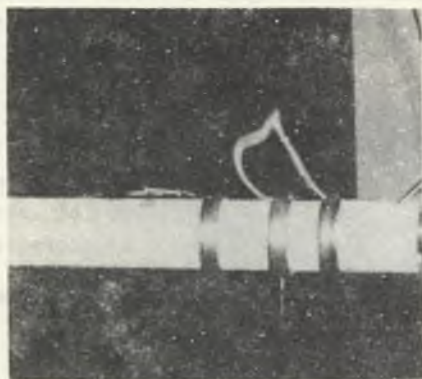
Rys. 9. Widok łuku cząstkowego o małej długości ($a_2 \leq 10$ mm) w układzie elektroizolacyjnym z niesymetryczną elektrodą uziemioną wg rys.3a

Fig. 9. The of a particle arc with a small length ($a_2 \leq 10$ mm) in the electro-insulating system according to Fig. 3a



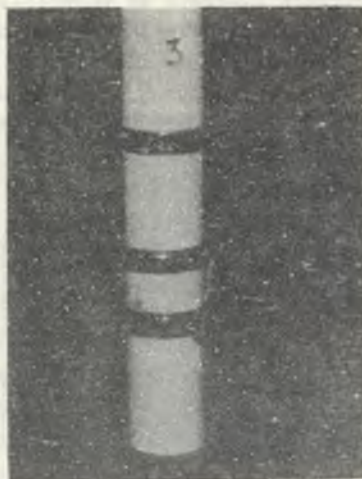
Rys. 10. Widok łuku cząstkowego o długości $a_2 = 35$ mm w układzie elektroizolacyjnym wg rys.3a

Fig. 10. The view of a particle arc with the length $a_2 = 35$ mm in the electro-insulating system according to Fig. 3a



Rys. 11. Widok wyładowania cząstkowego w układzie izolacyjnym z symetryczną elektrodą uziemioną

Fig. 11. The view of a particle flashover in the electroinsulating system according to Fig. 3c



Rys. 12. Widok wyładowania cząstkowego w układzie izolacyjnym wg rys. 3b

Fig. 12. The view of a particle are in the electro-insulating system according to Fig. 3b

Przy wydłużeniu czasu próby (oddziaływaniu łuku a_2) w miejscu lokalizacji jego stopy obserwowano punktowe nadpalenie powierzchni izolatora (uszkodzenie szkliwa). Moment uszkodzenia szkliwa był wyraźnie widoczny. Następowало bowiem przemieszczanie się stopy łuku z elektrody na powierzchnię materiału izolacyjnego przy elektrodzie E_0 . Równocześnie zmieniał się wyraźnie kształt łuku: malała chorągiew łuku i zbliżała się do powierzchni izolatora. W tych warunkach łuk cząstkowy palił się bardziej stabilnie, a jego wpływ na wytrzymałość elektryczną odstępów izolacyjnego (a_1) był mniejszy.

W położeniu pionowym pracy badanego układu elektroizolacyjnego (w układzie elektrod wg rys. 3c), jak pokazano na fotografiach - rys. 12 i 13b - łuk cząstkowy ($a_2 = 10 + 35$ mm) palił się w sposób zasadniczo różny niż w układzie poziomym. Przy określonym napięciu pomiędzy elektrodami E_0 i E_2 w różnych miejscach po obwodzie izolatora i wędrując ustalał niezupełnie stabilne (przesuwanie w lewo i w prawo) miejsce palenia się stopy łuku. Charakterystyczny jest fakt bardzo małej chorągwi łuku, która pali się praktycznie wzdłuż linii równoległej i blisko położonej względem powierzchni materiału izolacyjnego.

Kształt linii sił pola elektrycznego (dla elektrod o dużej krzywiznie w pobliżu materiału izolacyjnego) powodował, że stopa łuku graniczyła bezpośrednio z powierzchnią porcelany. W tych warunkach próby 1-minutowe - palenia się łuku (a_2) - prowadziły do silnego nagrzania się elektrod i lokalnie porcelany, co prowadziło do jej pęknięcia. Z tego też względu ograniczono czas oddziaływania łuku na odstępów izolacyjnym (a_2) do 15 s.

5. Wnioski

Wyniki badań wpływu łuków cząstkowych na wytrzymałość elektryczną powierzchniową układu elektroizolacyjnego pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1) Pomimo, że przyjęty w badaniach model układu elektroizolacyjnego niezupełnie ściśle odwzorowuje warunki palenia się i rozwoju łuku cząstkowego na powierzchni izolatora z warstwą zabrudzeń przemysłowych, to jednak uzyskane wyniki pomiarów pokazują, że wytrzymałość elektryczna powierzchniowa części izolatora niezobocznikowanej łukiem cząstkowym maleje w stosunku do wytrzymałości elektrycznej uzyskanej bez wykładawek cząstkowych - zależnie od długości łuku cząstkowego.

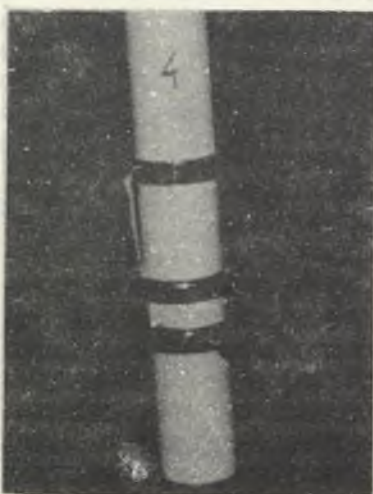
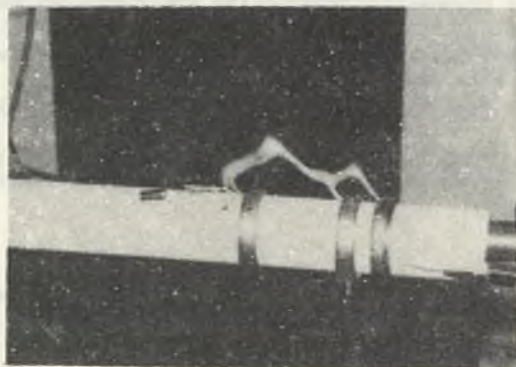
2) W położeniu poziomym układu izolacyjnego wydłużenie się łuku cząstkowego powoduje początkowo szybkie obniżanie się wytrzymałości elektrycznej części izolatora nie zobocznikowanej łukiem cząstkowym, by przy dalszym wzroście jego długości przejść do stanu prawie ustalonego - przy którym poziom napięcia przeskoku jest niezależny od dalszego zwiększania dłu-

gości łuku cząstkowego. Ustalony poziom napięcia przeskoku na części niezobocznikowanej łukiem cząstkowym wynosi około 20% wytrzymałości elektrycznej dla drogi przeskoku 120 mm i wykazuje tendencję dalszego obniżania się wraz ze zmniejszaniem się drogi przeskoku. Np. dla $a_1 = 50$ mm wytrzymałość zmalała do 10% wytrzymałości bez łuku cząstkowego. Można przypuszczać, że dalszy wzrost długości drogi wyładowania części niezobocznikowanej łukiem cząstkowym (a_1) (do ok. 1 m) spowoduje wzrost stosunkowy wytrzymałości elektrycznej izolatora w warunkach palącego się łuku cząstkowego - do wartości 0,25 - 0,45 poziomu napięcia wytrzymywanego bez wyładowań cząstkowych.

3) W pionowym położeniu pracy izolatora - przy dużej stabilizacji położenia stopy łuku cząstkowego i warunków ograniczających rozwój chorągwi łuku - stopień obniżenia się wytrzymałości elektrycznej części izolatora niezobocznikowanej łukiem cząstkowym jest mniejszy około dwukrotnie.

4) Wyniki badań wskazują, że duża odporność zabrudzeniowa izolatorów napowietrznych pracujących w położeniu poziomym nie jest wynikiem warunków rozwoju wyładowania powierzchniowego i jego oddziaływania na niezobocznikowaną łukiem cząstkowym część drogi przeskoku, lecz jest wynikiem warunków stanu powierzchni izolatorów - małe równomierne zabrudzenie.

5) Analizując przebieg zależności napięcia przeskoku części izolacyjnej niezobocznikowanej łukiem cząstkowym od długości łuku cząstkowego można stwierdzić, że jest ona podobna jakościowo i ilościowo do zależności poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego od konduktywności powierzchniowej $U_{pz} = f(\gamma_c)_p$.



Rys. 13. Widok wyładowania zupełnego i łuku cząstkowego w układzie izolacyjnym wg rys. 3c pracującym w położeniu pionowym - a i poziomym - b

Fig. 13. The view of a total flashover and particle arc on the surface of electro-insulating system according to Fig. 3c working: in a vertical position - a, and horizontal position - b.

LITERATURA

- [1] CRON H.: Der Fremdschichtüberschlag. Siemens Zeitschr. 1955.2.10/11, s. 427/475.
- [2] FRISCHMANN W.: Fremdschichtüberschlag und Fusspunkt wenderung. Deutsche Elektrot. 1957, z.7, ss. 290-295.
- [3] ESTROFF W., CRON H.: Der Hochspannungsisolator als Fremdschichtproblem. ETZ, z.3, 1952, ss. 57-62.
- [4] FN-75/E-04060. Pomiarы wysokonapięciowe. Próby napięciem przemien-
nym.
- [5] SKOWROŃSKI J., POHL Z.: The effect of the type of pollution on the selection of the shape of Outdoor insulators and testing. CIGRE, 1968, Rep. 25-07.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Jerzy Wodziński

Wpłynęło do redakcji dnia 30 czerwca 1989 r.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОЙ ДУГИ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Резюме

В статье представлены результаты лабораторных исследований влияния частичной дуги на поверхностную электрическую прочность изоляционной конструкции. Исследования проведены напряжением промышленной частоты 50 гц. Модель изоляционной конструкции изготовлена из фарфоровой трубы диаметром 71 мм, с электродами малой и большой кривизны грани. Длина разрядного промежутка изменялась в диапазоне 50 - 120 мм. Длина частичной дуги изменялась в диапазоне 5 - 35 мм.

Результат исследований показывает, что существует сильная зависимость поверхностной изоляционной прочности электроизоляционной системы от длины частичной дуги.

THE INFLUENCE OF PARTICLE ARCS ON THE SURFACE STRENGTH OF H.V. INSULATORS

Summary

The paper presents the results of laboratory tests on the influence of particle arcs on the surface electric strength of insulators-in a part which is not shunted by the particle arc. The tests have been carried out using the 50 Hz frequency alternating voltage for both vertical and level working positions of insulators. The insulator consisted of the electrical porcela in tube with outer diameter equal to 71 mm, with electrodes of both big and small boundary curvature.

The flashover path of the tested insulators was changed in the range from 50 to 120 mm. The length of shunted particle arcs way was changed in the range from 5 to 35 mm.

The results of experiments and measurements indicate that there is a considerable correspondence between the surface strength of insulators and the length of shunted particle arc.