

Sebastian ZAKRZEWSKI\*  
Władysław OPYDO\*\*

## WPLYW PODWÓJNEJ WARSTWY DIELEKTRYCZNEJ NA POWIERZCHNIACH ELEKTROD NA WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNĄ POWIETRZA I SZEŚCIOFLUORKU SIARKI

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu podwójnej warstwy dielektrycznej na powierzchniach elektrod na wytrzymałość elektryczną sprężonego powietrza i sprężonego sześćciofluorku siarki. Badania prowadzono przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Stwierdzono, że cienka powłoka izolacyjna na powierzchniach elektrod, złożona z warstwy tlenku aluminium i warstwy elektroizolacyjnego lakieru poliestrowego, powoduje znaczny przyrost wytrzymałości elektrycznej powietrza i sześćciofluorku siarki. Stwierdzono, że największy procentowo przyrost wytrzymałości elektrycznej tych gazów powłoka powodowała przy ciśnieniach gazów wyższych od ciśnienia atmosferycznego ( $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa). Do opracowywania wyników badań zastosowano program komputerowy Statistica [1].

### 1. WPROWADZENIE

Wysokonapięciową izolację elektryczną szyn zbiorczych, rozdzielnic osłoniętych oraz torów wielkoprądowych stanowią często sprężone gazy – powietrze lub sześćciofluorek siarki ( $\text{SF}_6$ ). Jednym z głównych czynników wpływających na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego, w których wysokonapięciową izolację stanowią sprężone gazy jest stan powierzchni elementów tworzących układ izolacyjny. Celem naszych badań było poszukiwanie takich sposobów przygotowania powierzchni tych elementów, które zwiększą odporność ich powierzchni na uszkodzenia mechaniczne i jednocześnie podwyższą wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego, który tworzą.

Dotychczasowe badania wpływu pokrycia powierzchni elektrod aluminiowych układu izolacyjnego powłokami tlenkowymi wykazały, że pokrycie może spowodować kilkunastoprocentowy wzrost wytrzymałości elektrycznej przy napięciu przemiennym (50 Hz) układów izolacyjnych ze sprężonym powietrzem [4] i ze sprężonym  $\text{SF}_6$  [5].

\* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

\*\* Politechnika Poznańska.

Niniejsza praca stanowi kontynuację tych badań i dotyczy wpływu, na wytrzymałość elektryczną powyższych układów, powłok izolacyjnych na powierzchniach elektrod, złożonych z dwóch warstw dielektrycznych – warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru izolacyjnego.

## 2. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO I METODY BADAŃ

W badaniach wykorzystano wykonaną ze stali nierdzewnej cylindryczną komorę o średnicy 40 cm i wysokości 70 cm. Szczegółowy opis komory przedstawiono w pracy [6].

Sprężone powietrze otrzymywano ze sprężarki bezolejowej. Wtłaczano je do komory poprzez filtr z silikazelem. Przed napełnieniem komory SF<sub>6</sub>, odpompowywano ją próżniową pompą obrotową do ciśnienia około 0,1 Pa, po czym wtłaczano do niej SF<sub>6</sub> z butli, poprzez filtr z silikazelem.

Układ izolacyjny tworzyły płaskie elektrody aluminiowe o średnicy 50 mm z krawędziami zaokrąglonymi wg wzoru Rogowskiego. Proces przygotowania powierzchni elektrod i wytwarzania na nich powłok tlenkowych podano w pracy [4].

W badaniach wykorzystano elektrody z warstwą tlenku aluminium grubości 5...10 μm [4]. Po wytworzeniu tej warstwy [4] elektrody wielokrotnie myto w wodzie destylowanej, wykorzystując płuczkę ultradźwiękową. Następnie suszono je w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 110°C przez kilka godzin. Po wysuszeniu i ostygnięciu elektrod, na warstwą tlenku na ich powierzchniach nanoszono techniką natryskową, kolejną warstwę, warstwę lakieru izolacyjnego. Następnie tak przygotowane elektrody suszono w temperaturze pokojowej przez kilka godzin, po czym warstwę lakieru na ich powierzchniach poddawano utwardzaniu w suszarce laboratoryjnej w temperaturze i przez czas podawany przez producenta lakieru. Grubość nanoszonej na warstwą tlenku, warstwy lakieru, wynosiła 30...40 μm.

Zestawienie lakierów izolacyjnych zastosowanych w tych badaniach zawiera tabela 1. Większość z tych materiałów to szybko schnące lakiery przeznaczone do zabezpieczania elementów elektrycznych, w szczególności tych, narażonych na wilgoć. Są one przeznaczone do pracy w różnych zakresach temperatur oraz przy różnych wartościach napiężeń elektrycznych.

Wysokie napięcie przemiennego o częstotliwości 50 Hz uzyskiwano z rezonansowego systemu probierczego RSZ-700-30-50 (do 700 kV, 500 kVA) prądu firmy Haefely Trench, zasilanego z sieci rozdzielczej średniego napięcia (15 kV).

Jeden z zacisków transformatora probierczego uziemiano i łączono z komorą probierczą połączoną z elektrodą dolną układu izolacyjnego, a drugi, poprzez rezystor o rezystancji 40 kΩ i izolatorem przepustowy w pokrywie górnej komory, łączono z elektrodą górną. Wysokie napięcie mierzono kilowoltomierzem elektrostatycznym.

Badania wytrzymałości elektrycznej układów ze sprężonym powietrzem oraz SF<sub>6</sub> przeprowadzono przy następujących wartościach ciśnienia:  $1 \cdot 10^5$ ,  $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa.

Tabela 1. Zestawienie materiałów, z których wykonywano powłoki nanoszone na warstwę tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych

Symbol powłoki	Nazwa/Producent	Rodzaj	Wytrzymałość elektryczna
			kV/mm
A	Urethan 71/Kontakt-Chemie	lakier poliuretanowy	40
B	FSC/Electrolube	silikon	80
C	Elektro 101/Elantas	żywica winylowa	100
D	Ultimeg 2000-380-45/AET	żywica alkidowo-fenolowa	120
E	Dolphon CC 1105/Synflex	lakier poliestrowy	160

Badane układy izolacyjne kondycjonowano bezprzeskokowo, gdyż w przypadku układów z elektrodami pokrytymi powłokami, przeskoki powodowały ich niszczenie. Kondycjonowanie to polegało na bardzo wolnym podnoszeniu napięcia z prędkością około 1 kV/min, aż do wystąpienia przeskoku. Wartość napięcia, przy którym występował ten pierwszy przeskok przyjmowano za wytrzymałość elektryczną układu.

Do opracowania matematycznego wyników badań wykorzystano program komputerowy Statistica [1]. Jako wartość reprezentatywną wielokrotnych pomiarów napięcia przeskoku przyjęto średnią arytmetyczną z pięciu wartości pomierzonych w tych samych warunkach eksperymentalnych, a jako miarę rozproszenia wyników pomiarów wokół średniej – odchylenie standardowe i 95% przedział ufności.

### 3. WYNIKI POMIARÓW, ICH ANALIZA ORAZ WNIOSKI

Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych: z powietrzem o ciśnieniu  $1 \cdot 10^5$ ,  $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa, z elektrodami bez powłok na powierzchniach, z powłokami tlenkowymi oraz z podwójnymi powłokami złożonymi z warstwy tlenku aluminium i z warstwy lakieru izolacyjnego, zestawiono w tabeli 2. Odległość między elektrodami wynosiła 3 mm. Przy tym wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych z elektrodami bez powłoki i z powłokami z tlenku aluminium pochodzą z pracy [4].

Z tabeli 2 wynika, że stosując podwójną warstwę dielektryczną na powierzchniach elektrod, złożoną z warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru izolacyjnego można znacznie zwiększyć wytrzymałość elektryczną układu

izolacyjnego ze sprężonym powietrzem. Np. uzyskany w ten sposób przyrost wytrzymałości elektrycznej układu, określony w stosunku do układu z elektrodami gołymi, przy ciśnieniu powietrza wynoszącym  $3 \cdot 10^5$  Pa oraz  $5 \cdot 10^5$  Pa, przy zastosowaniu warstwy z lakieru izolacyjnego oznaczonego symbolem E, przekracza 40%.

Tabela 2. Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych: z powietrzem o ciśnieniu  $1 \cdot 10^5$ ,  $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa, z elektrodami bez powłok na powierzchniach, z powłokami tlenkowymi oraz z podwójnymi powłokami złożonymi z warstwy tlenku aluminium i z warstwy lakieru izolacyjnego; odległość między elektrodami wynosiła 3 mm

Badany układ izolacyjny z elektrodami		Wartość ciśnienia	Wartość średnia napięcia przeskoku	Odchylenie standardowe	95% przedział ufności dla średniej
		Pa	kV	kV	kV
bez powłoki [4]		$10^5$	7,23	0,32	6,79-7,67
		$3 \cdot 10^5$	21,00	1,57	18,82-23,18
		$5 \cdot 10^5$	36,00	1,16	34,39-37,61
z powłoką $Al_2O_3$ [4]		$10^5$	7,60	0,35	7,11-8,09
		$3 \cdot 10^5$	25,50	1,67	23,18-27,82
		$5 \cdot 10^5$	39,75	1,39	37,82-41,68
z podwójną powłoką – $Al_2O_3$ + warstwa lakieru izolacyjnego o symbolu	A	$10^5$	8,50	0,31	8,07-8,93
		$3 \cdot 10^5$	27,11	1,85	24,54-29,68
		$5 \cdot 10^5$	45,89	1,37	43,98-47,8
	B	$10^5$	8,73	0,64	7,84-9,62
		$3 \cdot 10^5$	28,29	1,54	26,14-30,44
		$5 \cdot 10^5$	46,01	1,64	43,73-48,29
	C	$10^5$	8,78	0,85	7,6-9,96
		$3 \cdot 10^5$	30,00	1,18	28,36-31,64
		$5 \cdot 10^5$	49,78	2,21	46,71-52,85
	D	$10^5$	8,99	0,46	8,35-9,63
		$3 \cdot 10^5$	30,78	2,48	27,34-34,22
		$5 \cdot 10^5$	49,99	1,21	48,3-51,68
	E	$10^5$	9,02	0,94	7,71-10,33
		$3 \cdot 10^5$	31,01	1,66	28,7-33,32
		$5 \cdot 10^5$	51,32	1,55	49,17-53,47

Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych: z  $SF_6$  o ciśnieniu  $1 \cdot 10^5$ ,  $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa, z elektrodami bez powłok na powierzchniach, z powłokami tlenkowymi oraz z podwójnymi powłokami wykonanymi z warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru izolacyjnego, zestawiono w tabeli 3. Odległość między elektrodami wynosiła 3 mm. Przy tym wyniki wytrzymałości elektrycznej układów

izolacyjnych z elektrodami bez powłoki i z powłokami z tlenku aluminium pochodzą z pracy [5].

Tabela 3. Wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych: z SF<sub>6</sub> o ciśnieniu 1·10<sup>5</sup>, 3·10<sup>5</sup> i 5·10<sup>5</sup> Pa, z elektrodami bez powłok na powierzchniach, z powłokami tlenkowymi oraz z podwójnymi powłokami wykonanymi z warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru izolacyjnego; odległość między elektrodami wynosiła 3 mm

Badany układ izolacyjny z elektrodami		Wartość ciśnienia	Wartość średnia napięcia przeskoku	Odchylenie standardowe	95% przedział ufności dla średniej
		Pa	kV	kV	kV
bez powłoki [5]		10 <sup>5</sup>	18,89	0,30	18,47-19,31
		3·10 <sup>5</sup>	49,00	2,36	45,72-52,28
		5·10 <sup>5</sup>	75,03	2,72	71,25-78,81
z powłoką Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [5]		10 <sup>5</sup>	21,58	1,45	19,56-23,6
		3·10 <sup>5</sup>	62,04	2,60	58,43-65,65
		5·10 <sup>5</sup>	83,72	2,54	80,18-87,26
z powłoką – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + cienka warstwa lakieru izolacyjnego o symbolu	A	10 <sup>5</sup>	24,81	1,87	22,22-27,4
		3·10 <sup>5</sup>	67,00	2,24	63,89-70,11
		5·10 <sup>5</sup>	100,42	3,47	95,59-105,25
	B	10 <sup>5</sup>	25,15	2,06	22,28-28,02
		3·10 <sup>5</sup>	71,21	2,44	67,82-74,6
		5·10 <sup>5</sup>	106,60	2,16	103,6-109,6
	C	10 <sup>5</sup>	25,02	0,67	24,1-25,94
		3·10 <sup>5</sup>	76,45	4,72	69,88-83,02
		5·10 <sup>5</sup>	117,12	4,54	110,81-123,43
	D	10 <sup>5</sup>	24,45	2,20	21,39-27,51
		3·10 <sup>5</sup>	80,34	2,54	76,81-83,87
		5·10 <sup>5</sup>	121,80	3,84	116,46-127,14
	E	10 <sup>5</sup>	26,09	3,05	21,84-30,34
		3·10 <sup>5</sup>	81,89	5,33	74,48-89,3
		5·10 <sup>5</sup>	122,23	4,13	116,49-127,97

Z tabeli 3 wynika, że podwójna warstwa dielektryczna na powierzchniach elektrod, złożona z warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru izolacyjnego może znacznie zwiększyć wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego ze sprężonym SF<sub>6</sub>. Przyrost wytrzymałości układu spowodowany obecnością podwójnej warstwy dielektrycznej na powierzchniach elektrod był największy przy powłoce z warstwą lakieru izolacyjnego oznaczonego symbolem E. Wynosił on 52% przy ciśnieniu SF<sub>6</sub> o wartości 3·10<sup>5</sup> Pa i 67% przy ciśnieniu SF<sub>6</sub> o wartości 5·10<sup>5</sup> Pa.

Podsumowując można stwierdzić, że pokrycie powierzchni elektrod układu izolacyjnego podwójną powłoką dielektryczną, złożoną z warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru izolacyjnego, może powodować podwyższenie wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym o częstotliwości znamionowej sieciowej, układów izolacyjnych ze sprężonym powietrzem i z SF<sub>6</sub>. Największe przyrosty wytrzymałości elektrycznej badanych układów izolacyjnych powodowała powłoka złożona z warstwy tlenku aluminium i warstwy lakieru poliestrowego. W zakresie eksperymentu stwierdzono, że procentowy przyrost wytrzymałości elektrycznej badanych układów, spowodowany naniesioną na powierzchnie elektrod podwójną powłoką dielektryczną był najmniejszy przy najniższym ciśnieniu gazów ( $1 \cdot 10^5$  Pa) i znacznie większy przy wyższych ciśnieniach ( $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa).

Należy podkreślić, że warstwa lakieru poliestrowego, a szczególnie warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych mają bardzo dobre właściwości mechaniczne – dużą twardość. Chronią więc one powierzchnie elektrod przed możliwymi uszkodzeniami mechanicznymi, które mogą spowodować obniżenie wytrzymałości elektrycznej gazowego układu izolacyjnego. Dlatego stosowanie tych powłok, które jednocześnie podwyższają wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych, jako pokrycie izolacyjnych powierzchni elementów wiodących prąd przewodów osłoniętych, można uznać za celowe.

## LITERATURA

- [1] Lesińska E., Statistica Pl, StatSoft Polska, Kraków 1997.
- [2] Markiewicz H., Wołkowiński K., Urządzenia elektroenergetyczne, WNT, Warszawa 1982.
- [3] Opydo W., Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
- [4] Zakrzewski S., Opydo W., Effect of electrode material on electric strength of compressed air in uniform electric field, Poznan University of Technology, Academic Journals, Poznan 2010.
- [5] Zakrzewski S., Opydo W.: The effect of aluminum oxide layer located at the electrode surface on the electric strength of an insulation system provided with sulphur hexafluoride, Poznan University of Technology, Academic Journals, 2011.
- [6] Zakrzewski S.: Próby modyfikacji powierzchni elementów wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 246, Warszawa 2010.

**IMPACT OF THE DIELECTRIC DOUBLE LAYER LOCATED  
AT THE ELECTRODE SURFACE ON THE ELECTRIC STRENGTH  
OF AN INSULATION SYSTEMS WITH AIR AND SULPHUR HEXAFLUORIDE**

The paper presents results of an investigation of the impact of dielectric double layer located at the electrode surface on the electric strength of an insulation system provided with compressed air and compressed sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) subject to alternate voltage of 50 Hz frequency. It was found that in the case of the insulation system with air or SF<sub>6</sub> the electrode surface covered with the aluminum oxide layer and additionally insulating varnish improves the electric strength of the system. It was observed that the largest percentage increase electric strength has been caused by gas pressures higher than atmospheric pressure ( $3 \cdot 10^5$  i  $5 \cdot 10^5$  Pa). The test results were developed with the use of Statistica statistical analysis software.