

Sebastian ZAKRZEWSKI

PRÓBY MODYFIKACJI POWIERZCHNI ELEMENTÓW WYSOKONAPIĘCIOWYCH URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono próby modyfikacji powierzchni elementów wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych w celu zwiększenia ich wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej. Opisano konstrukcję komory do badań eksperymentalnych oraz przedstawiono wyniki badań wpływu materiału elektrod, obecności powłok dielektrycznych na elektrodach oraz ciśnienia na napięcie przeskoku w powietrzu przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Elektrody układu izolacyjnego były wykonane z aluminium, stali nierdzewnej, miedzi lub brązu. Badania przeprowadzono przy ciśnieniu o wartościach od 10^5 do $8 \cdot 10^5$ Pa.*

Słowa kluczowe: *komora, elektrody, powłoki dielektryczne*

1. WSTĘP

Dynamika rozwoju cywilizacji niesie ze sobą wciąż zwiększający się wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną zarówno w dużych ośrodkach przemysłowych jak i u odbiorców indywidualnych.

mgr inż. Sebastian ZAKRZEWSKI
e-mail: zakrzewski@utp.edu.pl

Instytut Elektrotechniki,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 246, 2010

Wzrastająca gęstość zaludnienia, wysoka cena gruntów oraz coraz mniejsza liczba terenów, na których mogłyby być umieszczone urządzenia elektroenergetyczne służące do wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej stawiają konstruktorów przed nowym wyzwaniem. Nowe konstrukcje maszyn, transformatorów, linii napowietrznych i kablowych oraz innych tego typu urządzeń muszą nie tylko charakteryzować ciągły wzrost parametrów znamionowych, ale także cechować się miniaturyzacją konstrukcji przy jednoczesnym zwiększeniu niezawodności działania konstruowanych urządzeń i minimalizacji strat energii elektrycznej.

Wszystkie te fakty zmuszają także projektantów do szukania nowych, bardziej ekonomicznych i ekologicznych metod wytwarzania, przesyłu i użytkowania energii elektrycznej.

Obecnie przesył energii elektrycznej dużej mocy odbywa się za pomocą m.in. napowietrznych linii elektroenergetycznych, kabli olejowych, kabli wysokich napięć o izolacji z tworzyw sztucznych, kabli kriogenicznych i nadprzewodzących. Jednak najbardziej ekonomicznym sposobem przekazywania energii na duże odległości są linie napowietrzne wysokich oraz najwyższych napięć prądu przemiennego i stałego [4, 6]. Fakt braku terenów w obrębach aglomeracji miejsko-przemysłowych pod takie inwestycje oraz aspekty ekologiczne (wymagania ochrony środowiska) skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań urządzeń do przesyłu energii elektrycznej, a także do poszukiwania nowych, coraz doskonalszych ośrodków gaszących łuk elektryczny i izolujących wysokie napięcie. Głównym nurtem działania w tym zakresie są nowoczesne kable energetyczne, naziemne tory wielkoprądowe, a także rozdzielnice izolowane sprężonym powietrzem lub sześćiofluorkiem siarki [1, 7].

Zaletą stosowania sprężonego powietrza jest jego dostępność. Ubytki powietrza mogą automatycznie uzupełniać sprężarki. Wadą natomiast jest niezbyt wysoka wytrzymałość elektryczna i wynikająca stąd konieczność stosowania stosunkowo wysokich ciśnień.

Sześćiofluorek siarki ma bardzo dobre właściwości elektroizolacyjne. Jest jednak drogi; toksyczne są niektóre produkty jego rozkładu, wymaga wypompowania powietrza z urządzenia przed napełnieniem.

Do głównych czynników wywierających decydujący wpływ na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego gazowego należy zaliczyć gęstość gazu (ciśnienie gazu), rodzaj materiału elektrod, stan ich powierzchni, odległość, pole powierzchni i kształt elektrod oraz powłoki dielektryczne.

Rodzaj materiału elektrod wywiera wpływ na wytrzymałość elektryczną sprężonych gazów, gdy natężenie pola elektrycznego przekracza 10-20 kV/mm. Wpływ rodzaju materiału elektrod jest bardzo mały albo niezauważalny w warunkach małych wartości iloczynu $p d$, tj. w pobliżu minimum krzywej Paschena. Wytrzymałość elektryczna sprężonych gazów zależy od materiału katody.

Ze wzrostem ciśnienia i natężenia pola elektrycznego wpływ materiału katody na wytrzymałość elektryczną jest coraz silniejszy.

Z przeglądu mechanizmów inicjowania przeskoku elektrycznego w próżniowych układach izolacyjnych wynika, że warunkiem uzyskania dużej wytrzymałości elektrycznej takich układów są gładkie i wolne od zanieczyszczeń powierzchniowych i mikrocząstek powierzchniowo elektrod [9].

Podobnie w przypadku wykorzystania sprężonego gazu jako izolacji wysokonapięciowej w przewodach osłoniętych – szynach zbiorczych, torach wielkopądowych bardzo duże znaczenie dla wytrzymałości elektrycznej i niezawodności działania urządzenia będzie miał sposób przygotowania powierzchni elementów tworzących układ izolacyjny.

Stan powierzchni tych elementów może ulegać zmianom, np. wskutek niestarannej obróbki lub niestarannego montażu. Szczególnie wrażliwe na uszkodzenia – odkształcenia mechaniczne są wypolerowane powierzchnie elementów wiodących prąd przewodów osłoniętych, które wykonane są z aluminium lub miedzi, czyli z materiałów mających małą twardość. Dlatego celem pracy jest poszukiwanie takich sposobów modyfikacji powierzchni tych materiałów, które zwiększą odporności powierzchni na uszkodzenia mechaniczne i jednocześnie nie spowodują obniżenia wytrzymałości elektrycznej wysokonapięciowych układów izolacyjnych.

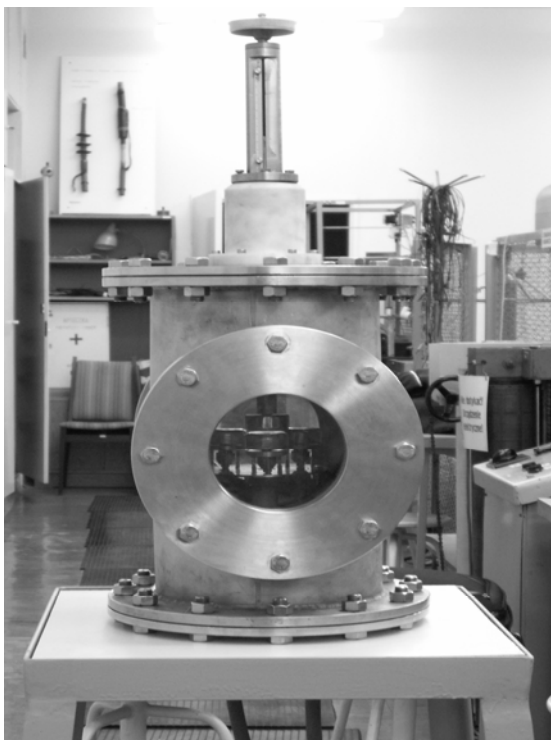
W celu zwiększenia wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej elementów wiodących prąd elektryczny można pokryć je cienkimi warstwami izolacyjnymi [8].

2. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

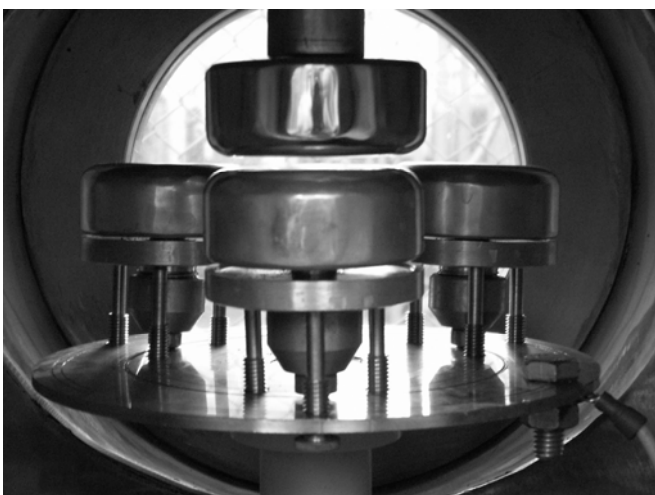
Komorę gazową w kształcie cylindra wykonano ze stali nierdzewnej, o średnicy 0,4 m i wysokości 0,7 m. Sprężone powietrze otrzymywano ze sprężarki bezolejowej i włączano do komory poprzez filtr z silikażelem, w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń powietrza. Badania prowadzono przy ciśnieniu od 10^5 do $8 \cdot 10^5$ Pa. Na rysunku 1 przedstawiono widok ogólny skonstruowanej komory do badań gazowych układów izolacyjnych. Korpus zamykany jest pokrywkami górną, dolną i dwiema bocznymi uszczelnionymi gumowymi orin-gami. Zdjęcie pokryw bocznych zapewnia łatwy dostęp do wnętrza komory.

Na pokrywach górnej i dolnej umieszczono izolatory przepustowe wykonane z teflonu. Na izolatorze górnym zamontowano układ regulacji przerwy międzyelektrodowej. W pokrywie dolnej umieszczono przewody wprowadzające do komory badany gaz oraz umożliwiające dokonanie pomiaru ciśnienia wewnątrz cylindra.

Na izolatorze przepustowym dolnym zamontowano pokrętło umożliwiające obrót podstawy elektrod umieszczonej wewnątrz komory (rys. 2). Umożliwiało to zmianę badanych elektrod bez konieczności otwierania komory i wymiany gazu (jednoosiowość elektrod). Jednocześnie wewnątrz komory można umieścić trzy badane elektrody.



Rys. 1. Widok ogólny komory gazowej



Rys. 2. Widok podstawy elektrod wewnątrz komory ciśnieniowej

Układ sterowania zawiera podzespoły elektryczne oraz pneumatyczne, które pozwalają na kontrolę parametrów badanego układu oraz na odczytanie wyników pomiarów.

Układ sterowania elektrycznego składa się z elementów sterujących, zabezpieczeń oraz autotransformatora, z którego zasila się transformator probierczy. Wysokie napięcie przemienne uzyskiwano z transformatora probierczego o mocy 10 kVA i przekładni 220 V/110 kV, zasilanego z sieci rozdzielczej niskiego napięcia o częstotliwości 50Hz.

Jeden z zacisków transformatora probierczego uziemiano i łączyono z elektrodą dolną układu izolacyjnego, a drugi, poprzez rezystor o rezystancji 40 k Ω i izolator przepustowy w pokrywie górnej komory, łączyono z elektrodą górną. Wysokie napięcie mierzono kilowoltomierzem elektrostatycznym.

Część pneumatyczna układu sterowania zawiera elementy pozwalające na sterowanie przepływem gazu zasilającego komorę ciśnieniową. Układ można zasilić w dwojaki sposób: pompą próżniową lub sprężarką. Zastosowano zawór trójdrożny umożliwiający wybór sposobu zasilania. Na drodze zasilania komory ciśnieniowej sprężarką zamontowano zawór suwakowy (zawór szybkiego rozprężania) oraz filtr mikrocząstek i zawór redukcyjny z ryglowaną głowicą regulacyjną.

Na przewodzie powrotu z komory ciśnieniowej dokonywany jest pomiar ciśnienia miernikiem cyfrowym.

3. PRZYGOTOWANIE ELEKTROD

Jak przedstawiono w rozdziale 1, jednym z głównych czynników wywierających decydujący wpływ na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego gazowego jest rodzaj materiału elektrod, stan i pole ich powierzchni oraz ich kształt.

Rodzaj materiału elektrod wywiera wpływ na wytrzymałość elektryczną sprężonych gazów, gdy natężenie pola elektrycznego przekracza 10-20 kV/mm. Wpływ rodzaju materiału elektrod jest bardzo mały albo niezauważalny w warunkach małych wartości iloczynu pd , tj. w pobliżu minimum krzywej Paschena [8].

W przedstawionym eksperymencie układ izolacyjny tworzyły elektrody płaskie wykonane z miedzi próżniowej (OFHC), aluminium (99,95%), stali nierdzewnej (H18N9) oraz brązu (CuSn10). Układ izolacyjny został tak zaprojektowany, aby pole elektryczne w przestrzeni między elektrodowej było zbliżone do jednorodnego. Elektroda górna i dolna miały średnice odpowiednio 40 mm

i 50 mm. Elektrody posiadały krawędzie o krzywiznie określonej według wzoru Rogowskiego [9]. Zarówno różnica w średnicach jak i krzywizna krawędzi miały na celu wyeliminowanie efektów krawędziowych. Czynnikiem zapewniającym uzyskanie dużej wytrzymałości elektrycznej jest dokładność obróbki i przygotowania elektrod

Przed umieszczeniem elektrod w układzie, ich powierzchnie szlifowano i polerowano mechanicznie, aż do uzyskania zwierciadlanego połysku. Następnie elektrody wielokrotnie myto w wodzie destylowanej, acetonie i alkoholu etylowym wykorzystując płuczkę ultradźwiękową.

Powłoki tlenkowe na powierzchniach wypolerowanych elektrod aluminiowych uzyskiwano w następujący sposób: najpierw elektrody wytrawiano przez 1 minutę, w 30% roztworze wodorotlenku potasu, a następnie starannie płukano w wodzie destylowanej. Warstwę tlenku aluminium otrzymywano w procesie utleniania anodowego w 20% roztworze kwasu siarkowego o temperaturze 20°C. Zmieniając gęstość prądu płynącego podczas utleniania anodowego oraz czas trwania utleniania uzyskano trzy grubości warstwy. Warunki fizykochemiczne procesu otrzymywania warstwy tlenku aluminium na elektrodach aluminiowych metodą utleniania anodowego przedstawiono w tabeli 1.

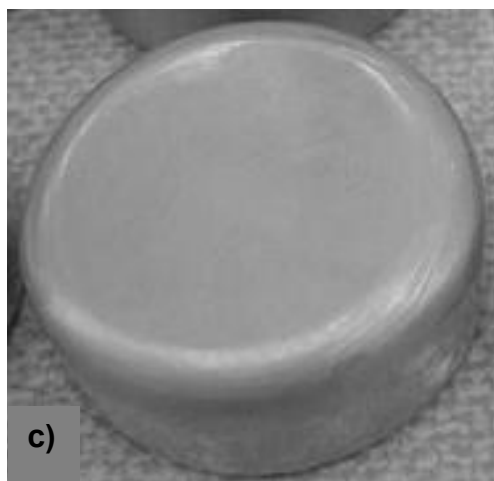
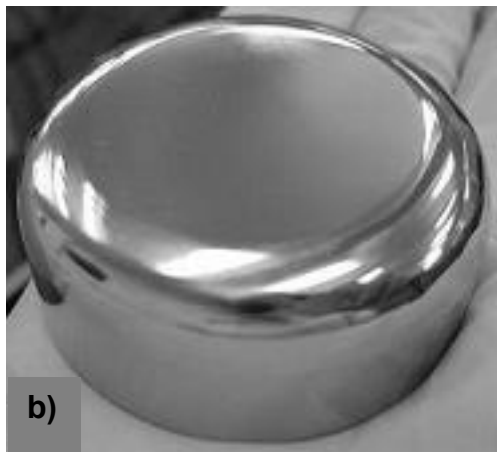
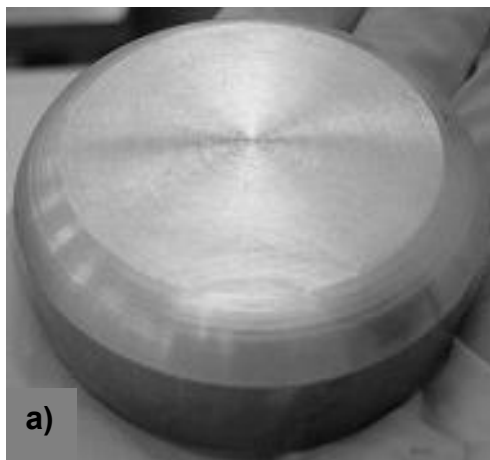
TABELA 1

Warunki fizykochemiczne procesu otrzymywania warstwy tlenku aluminium na elektrodach aluminiowych metodą utleniania anodowego

Symbol powłoki	Grubość warstwy	Skład chemiczny kąpeli	Gęstość prądu stałego	Czas utleniania	Temperatura kąpeli
-	µm	-	A/m ²	s	K
P1	5...10	20% H ₂ SO ₄	200	600	293
P2	12...16	20% H ₂ SO ₄	400	600	293
P3	14...19	20% H ₂ SO ₄	200	1800	293

Po utlenianiu anodowym elektrody były starannie płukane w wodzie destylowanej. Następnie warstwę tlenku na powierzchniach utwardzano przez kilkuminutowe gotowanie elektrody w wodzie destylowanej i suszono w suszarce w temperaturze 110°C przez 10 minut.

Na rysunku 3 przedstawiono wygląd elektrod w poszczególnych etapach ich przygotowania.



Rys. 3. Wygląd elektrod w poszczególnych etapach przygotowania:
a) po procesie obróbki skrawaniem, b) po procesach polerowania i płukania, c) widok elektrody z nałożoną warstwą tlenku aluminium

4. METODOLOGIA BADAŃ

W celu wykonania badań, układ izolacyjny należy poddać kondycjonowaniu [8]. Kondycjonowanie polega na wzroście napięcia przeskoku podczas serii pomiarów wytrzymałości elektrycznej i związane jest z usuwaniem tzw. słabych miejsc z powierzchni elektrod układu, które mogą ułatwić inicjowanie przeskoku. Takim miejscem jest każda niejednorodność powierzchni, np. słabo związane z powierzchnią cząstki różnorodnego pochodzenia, ostre mikro-występy, warstewki związków nieorganicznych (np. tlenków) lub organicznych itp. W czasie kondycjonowania napięcie przeskoku wzrasta wraz z liczbą zaistniałych przeskoku aż do pewnego poziomu, na którym wytrzymałość elektryczna się stabilizuje. W trakcie pomiarów pierwsze przeskoki występują zwykle przy napięciu niższym aniżeli kolejne. Liczba przeskoku kondycjonujących potrzebna do uzyskania stałego poziomu wytrzymałości zależy od stanu powierzchni elektrod oraz ich pola powierzchni.

Układy izolacyjne z elektrodami bez powłoki kondycjonowano przeskokami. Kondycjonowanie to polegało na spowodowaniu w układzie kilkunastu przeskoku, które stabilizowały wartość napięcia przeskoku. Przy tym napięcie podnoszono z prędkością około 0,5 kV/min, aż do wystąpienia przeskoku, po którym to napięcie obniżano o około 30%, odczekiwano na tym poziomie napięciowym przez 2 minuty, po czym napięcie podnoszono z poprzednią prędkością i tak kolejno proces ten powtarzano. Jako wartość wytrzymałości elektrycznej układu przyjmowano wartość napięcia po stabilizacji jego wartości.

Natomiast układy izolacyjne z powłokami na elektrodach kondycjonowano bezprzeskokowo (wyładowaniami niezupełnymi), gdyż przeskoki niszczyły powłoki. Kondycjonowanie to polegało na bardzo wolnym podnoszeniu napięcia z prędkością około 1 kV/min, aż do wystąpienia przeskoku. Wartość napięcia, przy którym występował ten przeskok przyjmowano za wytrzymałość elektryczną układu.

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.

Matematyczny opis zależności wytrzymałości elektrycznej powietrza od ciśnienia uzyskano stosując program komputerowy Statistica firmy StatSoft [5].

5. WYNIKI POMIARÓW, ICH ANALIZA I WNIOSKI

Na rysunku 4 przedstawiono wyznaczone zależności wytrzymałości elektrycznej (wartość skuteczna napięcia przeskoku) układu izolacyjnego z elektro-

dami wykonanymi z aluminium, stali nierdzewnej, miedzi i brązu, oddalonymi na odległość 1 mm (rys. 4a) i 3 mm (rys. 4b), od ciśnienia powietrza. Zależności te można dostatecznie dokładnie wyrazić matematycznie za pomocą wielomianu drugiego stopnia o następującej postaci

$$U_p = Ap^2 + Bp + C, \quad (1)$$

gdzie:

- U_p – wartość skuteczna napięcia przeskoku, w kV;
- p – ciśnienie powietrza, w barach (bar = 10^5 Pa);
- A, B, C – współczynniki wyznaczone z pomiarów eksperymentalnych.

W tabeli 2 zestawiono, wyznaczone wartości współczynników A, B i C wielomianu (1) aproksymującego zależności wytrzymałości elektrycznej badanych układów izolacyjnych od ciśnienia powietrza w zakresie od 10^5 do $8 \cdot 10^5$ Pa.

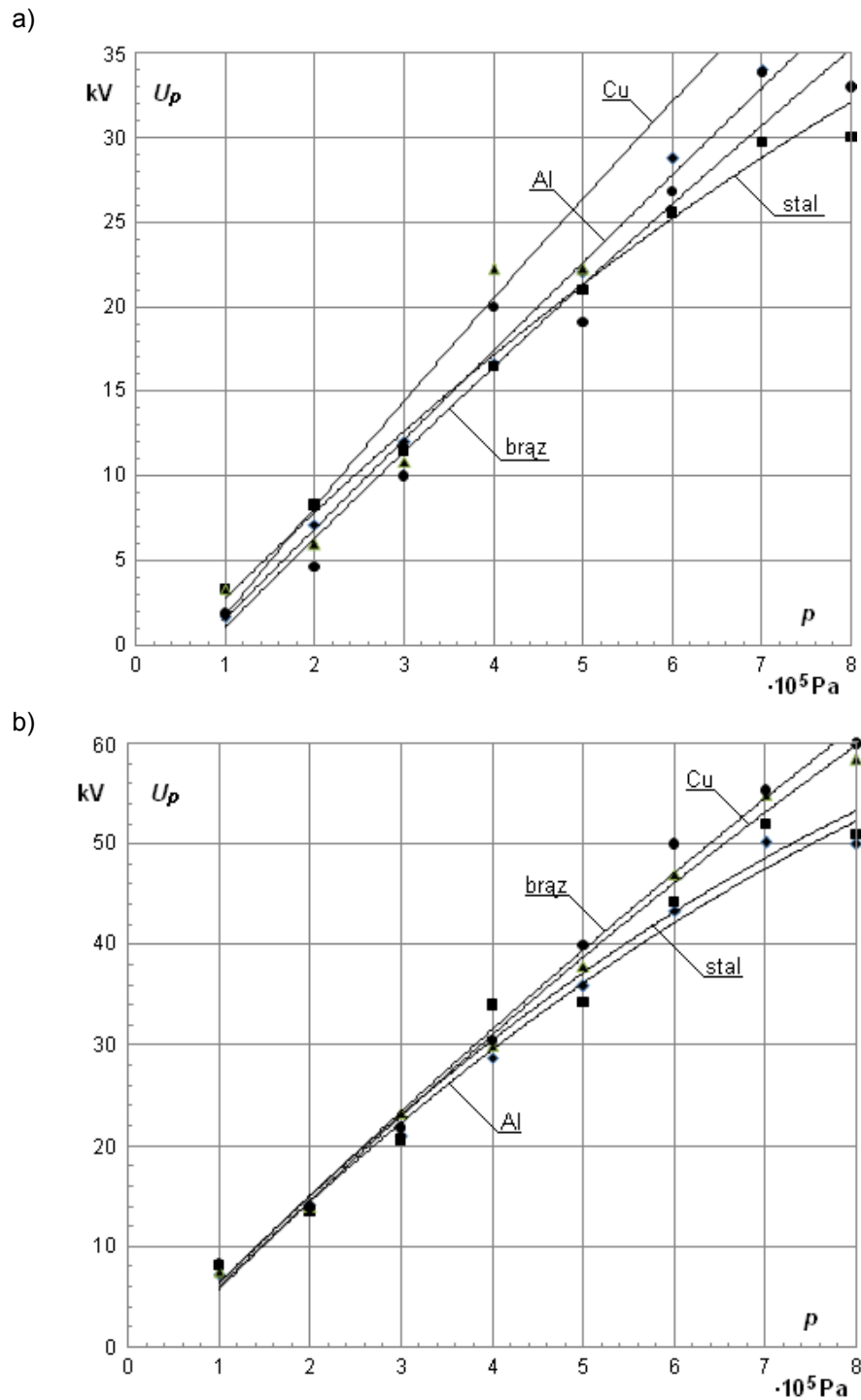
TABELA 2

Zestawienie wartości współczynników A, B i C wielomianu (1) opisującego matematycznie zależności wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych od ciśnienia powietrza

Lp.	Materiał elektrod	Odległość elektrod $d = 1$ mm			Odległość elektrod $d = 3$ mm		
		A	B	C	A	B	C
1.	aluminium	-0,02	5,38	-3,78	-0,12	8,05	-1,25
2.	stal nierdzewna	-0,15	5,53	-2,56	-0,10	8,09	-0,88
3.	miedź	-0,09	6,69	-4,82	-0,11	8,64	-1,84
4.	brąz	-0,06	5,43	-4,24	-0,13	9,05	-2,49

Z rysunku 4 wynika, że wpływ materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną badanych układów izolacyjnych pojawia się przy natężeniu pola elektrycznego powodującego przeskok wyższym od 15 kV/mm i wzrasta ze wzrostem wartości tego natężenia. Przy tym szereg materiałów elektrodowych ułożony zgodnie z malejącą wytrzymałością elektryczną przedstawia się następująco: miedź próżniowa, aluminium, brąz, stal nierdzewna.

Ponadto stwierdzono, że pokrycie powierzchni elektrod aluminiowych zastosowanymi powłokami tlenkowymi powoduje wzrost wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, przy czym największy wzrost wytrzymałości elektrycznej, przekraczający 20%, powoduje zastosowanie powłoki P3, mającej grubość 14...19 μ m.



Rys. 4. Zależność wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych z elektrodami aluminiowymi, stalowymi, miedzianymi i wykonanymi z brązu od ciśnienia powietrza, dla odległości między elektrodami wynoszącej 1 mm (a) i 3 mm (b)

Należy podkreślić, że warstwa tlenku aluminium na powierzchni ma bardzo dobre właściwości mechaniczne – bardzo dużą twardość porównywalną

z twardością najlepszych gatunków stali. Chroni więc ona powierzchnię elektrody przed możliwymi uszkodzeniami mechanicznymi, które mogą spowodować obniżenie wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych. Z tego względu stosowanie tych powłok jako pokryć izolacyjnych powierzchni elementów wiodących prąd, takich jak szyny zbiorcze, nowoczesne kable energetyczne czy naziemne tory wielkopięciowe można uznać za celowe.

LITERATURA

1. Bednarek K., Optymalizacja kształtu i przekroju trójfazowych osłoniętych torów wielkopięciowych izolowanych powietrzem, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
2. Bolin P. C., Trump J. G., Insulating vacuum gaps with dielectric cathode surfaces, III International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Paris 1968.
3. Jedynak L., Dielectric coatings in vacuum gaps, I International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Cambridge 1964.
4. Laudyn D.: Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
5. Lesińska E., Statistica Pl: poradnik użytkownika, StatSoft Polska, Kraków 1997.
6. Mościcka-Grzesiak H. (red.), Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. Tom II, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999
7. Nawrowski R., Tory wielkopięciowe izolowane powietrzem lub SF₆, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1998.
8. Opydo W., Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
9. Opydo W., Problemy wysokonapięciowej izolacji próżniowej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.

MODIFIED TESTS OF SURFACES ELEMENTS OF HIGH VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENTS

Sebastian ZAKRZEWSKI

ABSTRACT *The paper presents modified tests of surfaces elements of high voltage electrical equipments in order to increase their electric and mechanics materials strength. The paper also presents specification of construction of gas chamber used in high voltage gas insulated system and experimental investigation of influences of electrodes material and coating of electrodes on breakdown voltage of air in uniform field at a.c. voltage. There have been used the electrodes of aluminium, bronze, copper or stainless steel. The results were obtained at gas pressures from 10^5 to $8 \cdot 10^5$ Pa.*



Mgr inż. Sebastian ZAKRZEWSKI jest asystentem w Zakładzie Elektroenergetyki Instytutu Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. W 2004 roku ukończył kierunek elektrotechniki na Wydziale Telekomunikacji i Elektrotechniki UTP. Obecnie zajmuje się zagadnieniami wysokonapięciowej izolacji gazowej oraz badaniami nowych typów kabli energetycznych. Jest współautorem kilku prac z zakresu techniki wysokich napięć oraz gospodarki elektroenergetycznej opublikowanych w artykułach oraz materiałach konferencyjnych, a także autorem raportów badań kabli energetycznych. Jest członkiem Stowarzyszenia Elektryków Polskich.