

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI I ELEKTROTECHNIKI



PRACA DOKTORSKA

**WPLYW POWŁOK DIELEKTRYCZNYCH
NA POWIERZCHNIACH ELEKTROD
NA WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNĄ GAZOWYCH
UKŁADÓW IZOLACYJNYCH**

SEBASTIAN ZAKRZEWSKI

POZNAŃ, 2022 r.

STRESZCZENIE

Wpływ powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod na wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych

Praca doktorska podejmuje problematykę właściwości elektrycznych gazowych układów izolacyjnych. Rozprawa dotyczy badań wpływu obecności powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod aluminiowych i dodatkowego ich nasycenia (uszczelnienia) na wytrzymałość elektryczną układów izolacyjnych z powietrzem oraz sześćiofluorkiem siarki (SF_6) przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Dla realizacji celu głównego, badania przeprowadzono przy ciśnieniu gazu o wartościach $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa.

Osiągnięcie zakładanych w pracy celów było możliwe dzięki przeprowadzeniu systematycznego przeglądu literatury oraz badań eksperymentalnych. Na potrzeby realizowanych założeń badawczych zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, które umożliwiło osiągnięcie celów pracy.

Stwierdzono, że pokrycie powierzchni elektrod warstwą tlenku aluminium układów izolacyjnych z SF_6 powodowało zwiększenie wytrzymałości elektrycznej badanych układów, w zależności od ciśnienia gazu, od 10% do blisko 70%. Do wyznaczenia parametrów równania doświadczalnego opisującego zależności matematyczne wytrzymałości elektrycznej badanych układów od ciśnienia, a także statystyczne opracowanie wyników eksperymentów zastosowano programy komputerowe Statistica oraz Matlab.

W pracy dokonano analizę wpływu obecności zastosowanych powłok na parametry sygnałów emisji akustycznej (EA) towarzyszących wyładowaniom niezupełnym (wnz). Przeprowadzone analizy wykazały wpływ dodatkowych powłok na zarejestrowane sygnały EA, a więc pośrednio na wnz. Wyniki powyższych analiz pozwalają stwierdzić, że zastosowanie dodatkowych powłok dielektrycznych podnosi parametry użytkowe układu izolacyjnego.

Dodatkowo, kierując się doniesieniami literaturowymi, zmiany konfiguracji powierzchni elektrod układów izolacyjnych występujące w wyniku przeskoków badano skaningowym laserowym mikroskopem konfokalnym.

Struktura pracy jest następująca.

Pierwsze dwa rozdziały przedstawiają wyniki systematycznego przeglądu literatury. Przedstawiono właściwości gazowych układów izolacyjnych. Omówiono wpływ

czynników fizycznych na wytrzymałość gazowych układów izolacyjnych oraz przedstawiono przegląd mechanizmów inicjowania i rozwój przeskoku elektrycznego w gazach. W końcowej części rozdziału omówiono metody badań stanu izolacji stałej w gazach.

W rozdziale trzecim przedstawiono cel, tezę i zakres pracy doktorskiej.

Rozdział czwarty prezentuje informacje na temat zaprojektowanego i zbudowanego dla potrzeb pracy badawczej stanowiska pomiarowego oraz zastosowanej metody badawczej, natomiast piąty przedstawia omówienie badań wstępnych oraz badań wytrzymałości elektrycznej izolacyjnych z elektrodami pokrytymi powłokami dielektrycznymi będącymi tematem pracy oraz dodatkowo wyniki badań mechanizmu inicjowania przeskoku w układach izolacyjnych z dielektrykiem na elektrodach, na podstawie analizy wyładowań niezupełnych.

Pracę kończy rozdział szósty, który zawiera wnioski sformułowane w toku przeglądu literatury oraz badań eksperymentalnych oraz analizy uzyskanych wyników. Uzupełnienie pracy stanowi bibliografia.

Uzyskane w ramach pracy doktorskiej wyniki znacząco rozszerzają wiedzę o wpływie obecności powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod aluminiowych oraz dodatkowego ich nasycenia i wykraczają poza stan wiedzy zawarty w literaturze.

Słowa kluczowe: gazowe układy izolacyjne, wyładowania niezupełne, emisja akustyczna, powłoki dielektryczne, wytrzymałość elektryczna

ABSTRACT

The influence of dielectric coatings applied on the surface of electrodes on the electric strength of Gas Insulation Systems.

The purpose of this dissertation is to present the issue of electrical properties of Gas Insulation Systems. Its focus is the study of the influence of dielectric coatings applied on the surface of aluminium electrodes and their additional saturation (sealing) on the electric strength of insulation systems with air and Sulphur Hexafluoride (SF_6) at an Alternating Voltage frequency of 50 Hz. In order to achieve the main objective, various tests were conducted at the following levels of gas pressure: $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa and $5 \cdot 10^5$ Pa.

Achieving the goals of the dissertation involved systematic review of available literature and experimental research. For the purpose of assumptions of the study a test station was designed and constructed, which made it possible to achieve objectives of the dissertation.

It was found that by applying the layer of aluminium oxide over the surface of electrodes of insulating systems with SF_6 resulted in the increase of the electric strength of tested systems by 10% to nearly 70%, depending on the gas pressure. The parameters of the experimental equation describing the mathematical dependence of the electric strength of the tested system on the pressure were determined with the use of the Statistica and Matlab programs, which were also helpful in statistical determination of the results of the experimental study.

The thesis also includes analysis of the influence of the coatings in used on the parameters of acoustic emission signals accompanying Partial Discharges (PD).

Thanks to the conducted analyses it was found that additional coatings indeed have influence on the registered EA signals, and therefore indirectly on Partial Discharges. Because of the results of the aforementioned analyses it can be concluded that the use of additional dielectric coatings improves performance parameters of the insulation system.

Additionally, by following conclusions presented in literature, the changes in the electrode surface configuration of the insulation systems that occur due to flashovers were analysed with the use of a confocal laser scanning microscope.

The PhD thesis structure is as follows.

The first two chapters present the results of systematic review of literature.

Properties of the gas insulation systems are described there. The impact of physical factors on the strength of Gas Insulated Systems is also presented. The chapters also include the overview of the mechanisms for initiation and development of the electric flashover in gases. In the final section of the chapter the methods of testing the state of solid insulation in gases is discussed.

Chapter 3 describe the objective, the thesis assumptions and the scope of this doctoral dissertation.

Chapter 4 contains information on the test station that was designed and constructed for the purpose of the research work, as well as on used test method. Chapter 5 contains the discussion of the preliminary tests as well the tests of electric strength of insulation systems with the electrodes covered with dielectric coatings that the paper is devoted to. Additionally, the results of study of flashover initiation mechanism in the insulation systems with the dielectric coatings on the electrodes on the basis of the PD analysis.

The end of the dissertation, i.e. chapter 6 contains conclusions formed after the review of literature and experimental study as well as due to the analysis of obtained results.

The dissertation is complemented by the bibliography.

The obtained results as part of the doctoral dissertation significantly increase knowledge regarding the influence of the presence of dielectric coatings on the surface of electrodes and their additional saturation, which definitely go beyond and enrich the knowledge found in the literature.

Key words: gas insulation systems, partial discharges, acoustic emission, dielectric coatings, electric strength

PODZIĘKOWANIA

Pragnąłbym podziękować prof. dr. hab. inż. Władysławowi Opydo, bez którego pomocy i wsparcia ta praca by nie powstała,

Chciałbym podziękować Żonie Karolinie, za wspieranie mnie przez cały okres pracy nad doktoratem,

Dziękuję koledze dr. inż. Arkadiuszowi Dobrzyckiemu.

Spis treści

1. WSTĘP	9
2. WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE GAZOWYCH WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH	12
2.1. Czynniki wpływające na wytrzymałość gazowych układów izolacyjnych	13
2.2. Wyładowania elektryczne w wysokonapięciowych układach izolacyjnych z elektrodami pokrytymi powłokami dielektrycznymi	21
2.3. Rozwój wyładowań w gazowych układach izolacyjnych.....	32
2.4. Metody badań stanu izolacji stałej w gazach	36
2.4.1. Metoda klasyczna, oparta na pomiarze wielkości podstawowych charakteryzujących wnz	37
2.4.2. Metoda wykorzystująca obraz oscylograficzny	38
2.4.3. Metoda emisji akustycznej	40
3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY	42
4. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO I METODY BADAWCZEJ	44
4.1. Opis komory ciśnieniowej i układu pomiarowego	44
4.2. Przygotowanie powierzchni elektrod oraz kontrola ich stanu	48
4.3. Badania eksperymentalne wytrzymałości elektrycznej badanych układów izolacyjnych	54
4.4. Analiza sygnałów akustycznych towarzyszących wnz w układach z i bez dodatkowych powłok dielektrycznych.....	55
4.5. Analiza statystyczna wyników badań	58
5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	61
5.1. Badania wstępne	61
5.2. Badania wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych z elektrodami pokrytymi powłokami dielektrycznymi	64

5.3. Analiza zmian stanu powierzchni elektrod wskutek występowania przeskoków	74
5.4. Badania mechanizmu inicjowania przeskoku w układach izolacyjnych z dielektrykiem na elektrodach, na podstawie analizy wyładowań niezpełnych	80
5.4.1 Wpływ wielokrotnych wyładowań na parametry sygnałów emisji akustycznej	86
5.4.2 Analiza mechanizmu wyładowań badanych układów izolacyjnych.....	90
6. PODSUMOWANIE, UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI.....	92
Literatura.....	95

1. WSTĘP

Dynamiczny rozwój cywilizacji niesie ze sobą systematyczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną zarówno w dużych ośrodkach przemysłowych jak i u odbiorców indywidualnych. 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, całych rozdzielnic oraz innych tego typu urządzeń muszą nie tylko spełniać coraz wyższe parametry techniczne, ale także cechować się miniaturyzacją konstrukcji przy jednoczesnym zwiększeniu niezawodności działania konstruowanych urządzeń i minimalizacji strat energii elektrycznej.

Powyższe 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 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 (HVAC) i stałego (HVDC) [6, 9, 51, 54, 65, 69, 89]. Fakt braku terenów w obrębach aglomeracji miejsko-przemysłowych pod takie inwestycje oraz aspekty ekologiczne (wymagania ochrony środowiska) skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań technologicznych urządzeń służących do przesyłu energii elektrycznej. Przede wszystkim są to nowe technologie kabli energetycznych i naziemnych torów prądowych rurowych izolowanych powietrzem lub sześćiofluorkiem siarki oraz nieekranowane tory prądowe o izolacji gazowej lub stałej (szyny zbiorcze). Oba te media wykorzystuje się również do izolowania całych rozdzielnic.

Problematyka właściwości elektrycznych gazowych układów izolacyjnych stanowi jedną z podstawowych dziedzin w tematyce wysokonapięciowej, która w dalszym ciągu cieszy się dużym zainteresowaniem wśród badaczy.

Szynoprzewody izolowane SF₆ znajdują zastosowanie we wszystkich punktach systemu elektroenergetycznego zarówno dla SN jak i WN [7, 8, 11, 26, 59, 68]. Zastosowanie tego typu przewodów umożliwia uzyskanie prądów znamionowych rzędu

8 kA przy chłodzeniu naturalnym i do 12 kA przy chłodzeniu wymuszonym. Przewody izolowane SF₆ ze względu na wiele zalet technicznych oraz przesłanki ekonomiczne, stały się konkurencyjne w stosunku do innych znanych i stosowanych obecnie małogabarytowych torów wieloprądowych. Podobną konstrukcję posiadają trójfazowe osłonięte tory wieloprądowe izolowane powietrzem. Na rysunku 1.1 przedstawiono przekrój i zastosowanie toru wieloprądowego okapturzonego.



Rys. 1.1. Przekrój i zastosowanie toru wieloprądowego okapturzonego [45]

Sześćciofluorek siarki ze względu na wspomniane właściwości znalazł szerokie zastosowanie w budowie osłoniętych rozdzielnic elektrycznych. To z kolei pozwala na zmniejszenie obszaru zajmowanego przez instalację i polepszenie rozplanowania stacji elektroenergetycznej. Hermetyczna obudowa zarówno szynoprzewodów jak i rozdzielnic osłoniętych sprawia, iż system oparty na wykorzystaniu gazu SF₆ jest niezależny od zanieczyszczeń atmosferycznych i procesów degradacyjnych, a także posiada znacznie ograniczone wymagania odnośnie konserwacji, przeglądów i napraw; w rezultacie większa niezawodność, wytrzymałość i dyspozycyjność, ograniczenie strat energii i zagrożenia pożarowego. Na rysunku 1.2 przedstawiono modułową rozdzielnicę średniego napięcia w izolacji SF₆.



Rys. 1.2. Modułowa rozdzielnica średniego napięcia w izolacji SF₆ [42]

Rodzaj zastosowanej izolacji wysokonapięciowej ma największy wpływ na gabaryty wysokonapięciowego urządzenia. Badania właściwości elektroizolacyjnych próżni i gazów – w tym i sześćiofluorku siarki – trwające już od 100 lat, są prowadzone do dnia dzisiejszego, gdyż część tych właściwości i zachodzących zjawisk nie została poznana lub opisana w sposób jednoznaczny [83, 109].

W niniejszej pracy dokonano analizy wpływu powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod gazowych układów izolacyjnych (powietrznych oraz z sześćiofluorkiem siarki) na wytrzymałość elektryczną tych układów. Położono nacisk na zminimalizowanie kosztów produkcji i eksploatacji tychże układów izolacyjnych z zachowaniem wszystkich zadanych parametrów elektrodynamicznych.

W pracy opisano wpływ, jaki obecność dodatkowych powłok dielektrycznych umieszczonych na powierzchni elektrod w wysokonapięciowym gazowym układzie izolacyjnym (GIS) ma na parametry sygnałów emisji akustycznej (EA) towarzyszących wyładowaniom niepełnym oraz przeprowadzono analizę mechanizmu inicjowania przeskoku w układach izolacyjnych z dielektrykiem na elektrodach, z wykorzystaniem metody emisji akustycznej.

Jako metodę poszukiwania rozwiązania optymalnego przeprowadzono serie badań laboratoryjnych, które wykonano na opracowanym w tym celu stanowisku eksperymentalnym.

Praca składa się z sześciu rozdziałów. W rozdziale drugim przedstawiono właściwości gazowych układów izolacyjnych. Omówiono wpływ podstawowych czynników fizycznych na wytrzymałość gazowych układów izolacyjnych (podrozdział 2.1) oraz przedstawiono przegląd mechanizmów inicjowania i rozwój przeskoku elektrycznego w gazach. W końcowej części rozdziału omówiono metody badań stanu izolacji stałej w gazach (podrozdział 2.4).

W rozdziale trzecim przedstawiono cel, tezę i zakres pracy doktorskiej.

Kolejna część pracy (rozdział czwarty) zawiera informacje na temat zaprojektowanego i zbudowanego dla potrzeb pracy badawczej stanowiska pomiarowego oraz zastosowanej metody badawczej.

Omówienie badań wstępnych oraz badań wytrzymałości elektrycznej izolacyjnych z elektrodami pokrytymi powłokami dielektrycznymi będącymi tematem pracy, a następnie analizę uzyskanych wyników przedstawiono w rozdziale piątym. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań mechanizmu inicjowania przeskoku w układach izolacyjnych z dielektrykiem na elektrodach, na podstawie analizy wyładowań niepełnych.

W ostatnim, szóstym rozdziale, przedstawiono uwagi końcowe oraz wnioski wynikające z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz analizy uzyskanych wyników.

2. WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE GAZOWYCH WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

O wymiarach urządzeń elektroenergetycznych i ich niezawodności działania w bardzo dużym stopniu decyduje rodzaj i wytrzymałość elektryczna zastosowanej w nich izolacji wysokonapięciowej. Dlatego coraz częściej jako izolację elektryczną wykorzystuje się sprężone gazy – powietrze oraz sześćiofluorek siarki. Szczególnie do izolowania szyn zbiorczych i całych rozdzielnic oraz torów wielkoprądowych [6, 9, 50].

Zaletą stosowania sprężonego powietrza jest jego dostępność. Ubytki powietrza mogą automatycznie uzupełniać sprężarki. Wadą natomiast jest niezbyt wysoka (znacznie niższa niż dla SF₆) wytrzymałość elektryczna i wynikająca stąd konieczność stosowania stosunkowo wysokich ciśnień.

Zainteresowanie SF₆ wynika przede wszystkim z takich właściwości elektrycznych tego ośrodka jak duża wytrzymałość elektryczna oraz dobre właściwości gaseniowe łuku elektrycznego. Duże znaczenie ma także nietoksyczność tego medium; toksyczne w pewnym stopniu są tylko produkty rozpadu SF₆, ale przy małej aktywności chemicznej i niepalności SF₆ nie ma to najczęściej istotnego znaczenia [13, 16, 81, 109].

Nawet w silnym polu elektrycznym sześćiofluorek słabo przewodzi prąd elektryczny. Ze wzrostem wartości natężenia tego pola traci on właściwości izolacyjne i w końcu rozwija się w nim wyładowanie elektryczne, które niekorzystnie oddziałuje na stan techniczny urządzeń – powodując degradację materiałów i straty mocy, a w krańcowym przypadku – zwarcie obwodu. Ponadto wyładowania są źródłem zakłóceń elektromagnetycznych. Z tego względu, urządzenia projektuje i konstruuje się tak, aby eliminować w nich potencjalne wyładowania albo przynajmniej ograniczyć ich intensywność i czas występowania [83].

Wymogi coraz większych prądów i napięć znamionowych, przy zachowaniu dotychczasowych wymiarów urządzeń elektroenergetycznych, wymagają na etapie projektowania i konstruowania urządzeń elektroenergetycznych jak najdokładniejszego opisu zjawisk fizycznych zachodzących w tego typu urządzeniach. Znajomość relacji ilościowych i jakościowych między wieloma parametrami elektromechanicznymi (straty mocy, siły dynamiczne, temperatury, naprężenia elektryczne) a parametrami konstrukcyjnymi (materiały, kształty, wymiary) jest niezbędna w procesie projektowania, wymagającego również uwzględnienia kosztów produkcji i eksploatacji oraz wymogów bezpieczeństwa i niezawodności.

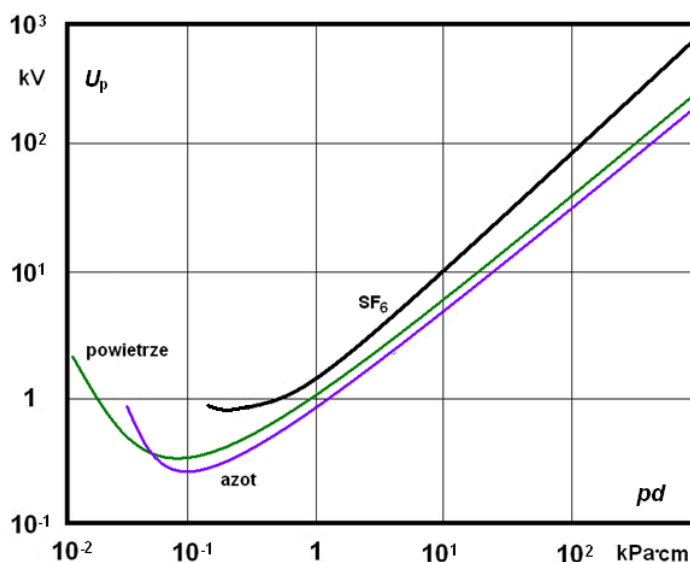
Wymagania związane z niezawodnością działania urządzeń elektroenergetycznych zmuszają do oceny wpływu wszystkich czynników fizycznych w istotnym stopniu wpływających na wytrzymałość elektryczną gazów izolacyjnych. Często niedotrzymanie tylko jednego z parametrów pracy urządzenia może doprowadzić do przeskoku elektrycznego.

2.1. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA WYTRZYMAŁOŚĆ GAZOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Do podstawowych czynników wpływających na wytrzymałość elektryczną układów izolacyjnych gazowych należy zaliczyć [30, 31, 82]:

- wartość ciśnienia w układzie izolacyjnym,
- temperaturę elektrod,
- sposób kondycjonowania układu,
- rodzaj materiału elektrodowego,
- pole powierzchni elektrod,
- obecność powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod.

Wytrzymałość elektryczna gazów elektroizolacyjnych nie może być obliczana jako iloraz napięcia przeskoku i odstępów między elektrodami w dowolnym zakresie tych odstępów. W normalnych warunkach atmosferycznych wartość wytrzymałości powietrza wynosi około 32 kV/cm (pole jednostajne). W przypadku innej odległości między elektrodami i innych niż normalne warunków pod względem ciśnienia i temperatury wartość napięcia przeskoku wyznacza się z charakterystyki Paschena. Jest to zależność napięcia przeskoku U_p w polu jednostajnym od iloczynu gęstości względnej gazu δ i odstępów między elektrodami d , a przy stałej temperaturze funkcją iloczynu ciśnienia p gazu i odstępów d między elektrodami $U_p = f(p \cdot d)$ [31]. Na rysunku 2.1 przedstawiono wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych (przy napięciu przemiennym), od iloczynu ciśnienia i odległości elektrod.



Rys. 2.1. Charakterystyka Paschena – zależność napięcia początkowego U_p wyładowań w powietrzu, SF_6 i azocie od iloczynu ciśnienia p i odległości między elektrodami d [31]

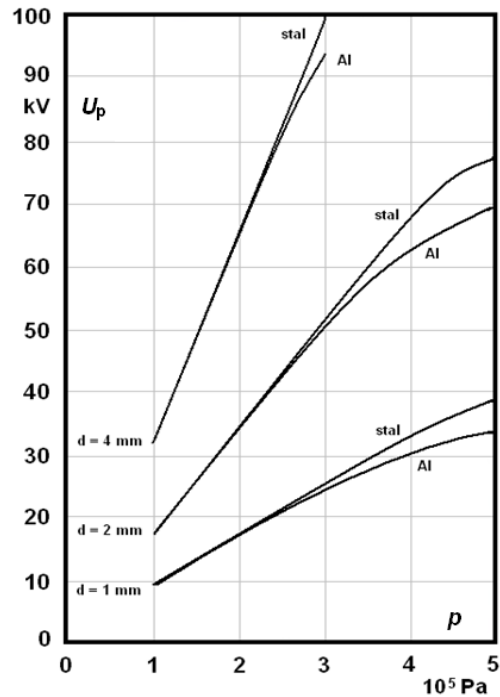
Przedstawiona przez Paschena zależność $U_p = f(p \cdot d)$ wynika ze sformułowania przez Townsenda warunku wyładowania samodzielnego w gazie, a mianowicie: przejście wyładowania niesamodzielnego w samodzielne następuje w wyniku procesów wtórnych na katodzie, tj. uwalniania elektronów z katody przez jony dodatnie. Te zjawiska wtórne (w stosunku do pierwotnych lawin elektronowych) powodują wzrost prądu niezależnie od działania zewnętrznych czynników jonizacyjnych. Charakterystyka Paschena jest podstawą projektowania gazowych układów izolacyjnych w polu jednostajnym i quasi-jednostajnym.

Rodzaj materiału elektrod oraz stan ich powierzchni 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 $p \cdot d$, 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.

Rodzaj materiału anody nie ma zwykle wpływu na wytrzymałość elektryczną sprężonych gazów. Jeżeli taki wpływ zostanie odnotowany to jest to prawdopodobnie spowodowane obecnością materiału anody na powierzchni katody, przeniesionego między elektrodami podczas kondycjonowania i związanego z tym rozpylania anody. Szczególnie kondycjonowanie przeskokami powoduje odrywanie od powierzchni elektrod wielu cząstek materiału, które mogą inicjować kolejne przeskoki.

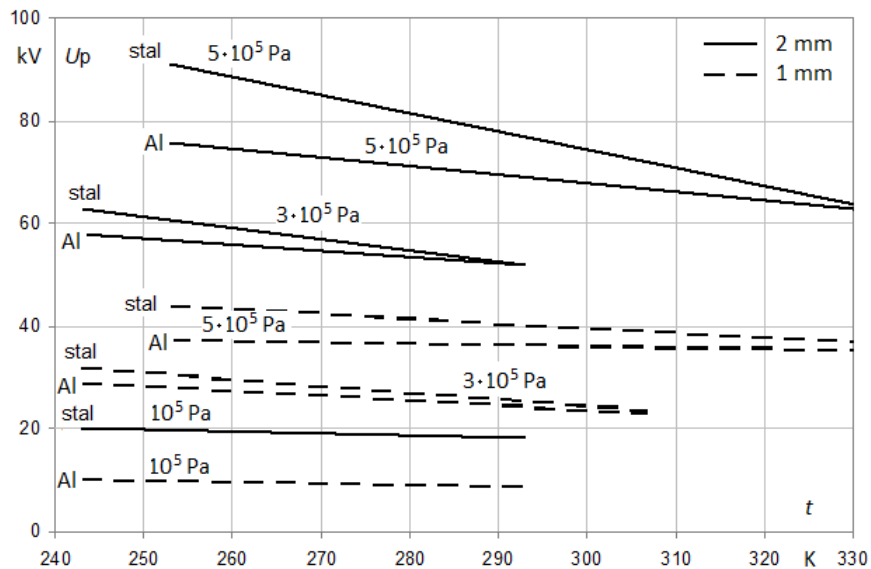
Badania wykazały, że odchylenia od prawa Paschena pojawiają się dopiero przy pewnych wartościach iloczynu ciśnienia p gazu i wysokości h największych mikronierówności powierzchni elektrod. W przypadku sześćfluorku siarki odchylenia te pojawiają się przy wartościach iloczynu $p \cdot h$ wynoszących około 4 kPa·mm, natomiast

w przypadku powietrza przy wartościach $p \cdot h$ dziesięciokrotnie większych. Na rysunku 2.2 przedstawiono zależność napięcia przeskoku (dla napięcia stałego) w SF₆ od wartości ciśnienia gazu przy różnych odległościach elektrod d wykonanych ze stali nierdzewnej lub z aluminium.



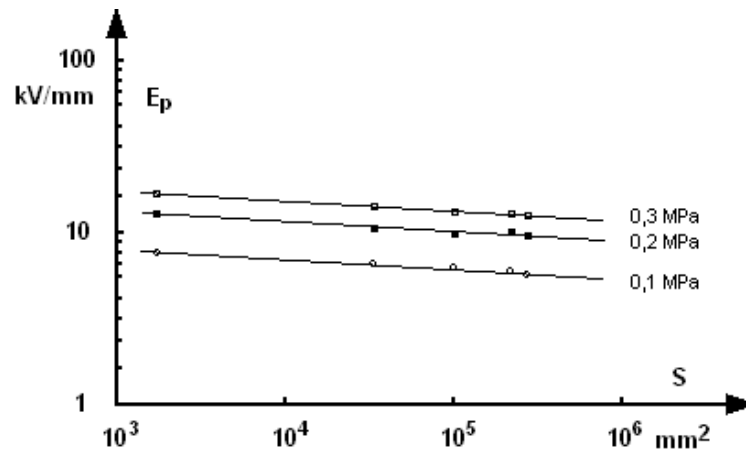
Rys. 2.2. Zależność napięcia przeskoku (napięcie stałe) w SF₆ od wartości ciśnienia gazu; różne odległości elektrod d ; elektrody płaskie wykonane ze stali nierdzewnej lub z aluminium [83]

Autorzy pracy [48] określili wpływ temperatury na napięcie przeskoku w SF₆ w polu jednostajnym przy napięciu stałym. Elektrody wykonane były z aluminium lub ze stali nierdzewnej. Na rysunku 2.3 przedstawiono napięcie przeskoku w układzie izolacyjnym z SF₆ i z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej oraz aluminium dla odległości międzyelektrodowej 1 i 2 mm, w zależności od temperatury, przy różnych ciśnieniach gazu.



Rys. 2.3. Zależność napięcia przeskoku w układzie izolacyjnym z SF_6 i z elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej oraz aluminium dla odległości międzyelektrodowej $d = 1 \text{ mm}$ i $d = 2 \text{ mm}$, w zależności od temperatury, przy różnych ciśnieniach gazu [48]

Napięcie przeskoku w gazach zależy również od pola powierzchni elektrod i maleje ze wzrostem tego pola (rys. 2.4) [18, 28, 60, 70]. Zjawisko to najczęściej tłumaczone jest rosnącą wraz ze wzrostem pola powierzchni elektrod liczbą tzw. słabych miejsc w układzie, mających szczególnie dobre warunki inicjowania i rozwoju przeskoku.

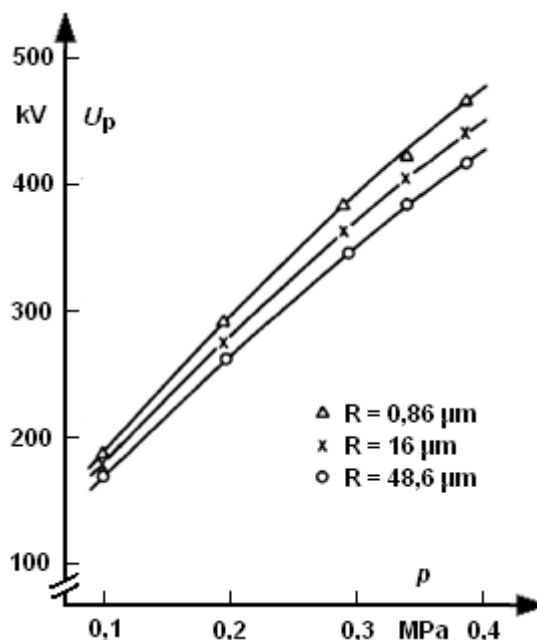


Rys. 2.4. Zależność wartości skutecznej naprężenia przeskoku (napięcie przemienne) w sześćciofluorku siarki od pola powierzchni elektrod [64]

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 ma stan powierzchni elementów tworzących wysokonapięciowy układ izolacyjny.

W tym przypadku duże znaczenie mają mikronierówności i luźne cząsteczki materiału elektrody, które obniżają wytrzymałość elektryczną gazowego układu izolacyjnego.

Badania wpływu chropowatości powierzchni na wytrzymałość gazowego układu izolacyjnego z SF₆ z elektrodami wykonanymi z aluminium przedstawiono w [71]. Na rysunku 2.5 przedstawiono zależność napięcia przeskoku przy napięciu przemiennym dla elektrod o różnej chropowatości, wykonanych z aluminium od wartości ciśnienia SF₆ w komorze.



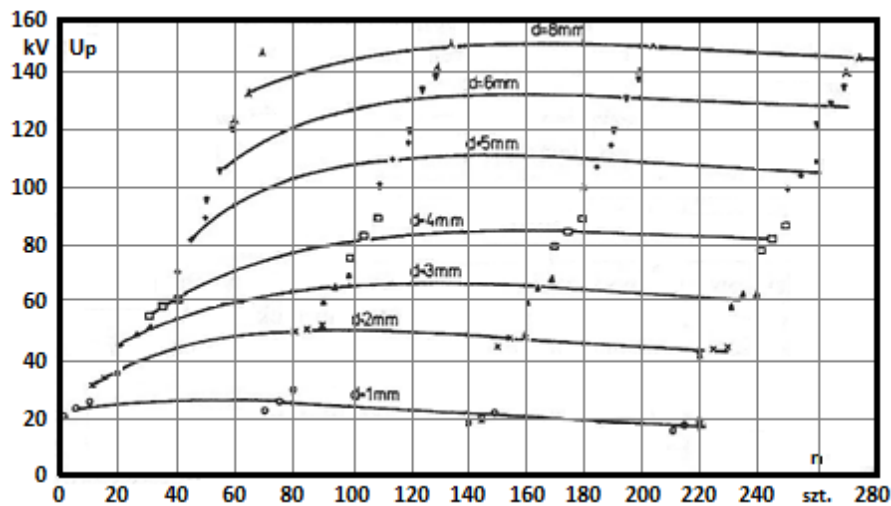
Rys. 2.5. Zależność napięcia przeskoku przy napięciu przemiennym dla elektrod o różnej chropowatości, wykonanych z aluminium od wartości ciśnienia SF₆ [71]

Istotnym również czynnikiem wpływającym na wytrzymałość gazowego układu izolacyjnego jest sposób kondycjonowania układu. Kondycjonowanie gazowego układu izolacyjnego polega na wykonaniu zabiegów, mających na celu wzrost wytrzymałości badanego układu izolacyjnego [83]. Wzrost wytrzymałości związany jest ze zmianami stanu powierzchni elektrod i polega na zwiększaniu napięcia przeskoku podczas serii pomiarów wytrzymałości elektrycznej danego układu i związane jest z usuwaniem tzw. słabych miejsc z powierzchni elektrod układu, które mogą ułatwić inicjowanie przeskoku. Takimi słabymi punktami jest każda niejednorodność powierzchni, między innymi słabo związane z powierzchnią cząstki różnorodnego pochodzenia, ostre mikrowystępy, cienkie naloty związków nieorganicznych (np. tlenków) lub organicznych itp. Podczas kondycjonowania napięcie przeskoku wzrasta wraz z liczbą zaistniałych przeskoków aż do pewnego poziomu, na którym wytrzymałość elektryczna się ustabilizuje. Pierwsze przeskoki występują zwykle przy napięciu niższym aniżeli kolejne. Liczba przeskoków kondycjonujących potrzebna do uzyskania stałego poziomu wytrzymałości zależy od stanu powierzchni elektrod oraz ich pola powierzchni.

Zabieg kondycjonowania można przeprowadzić także bezprzeskokowo. Wówczas gazowy układ izolacyjny poddaje się długiemu działaniu napięcia, którego

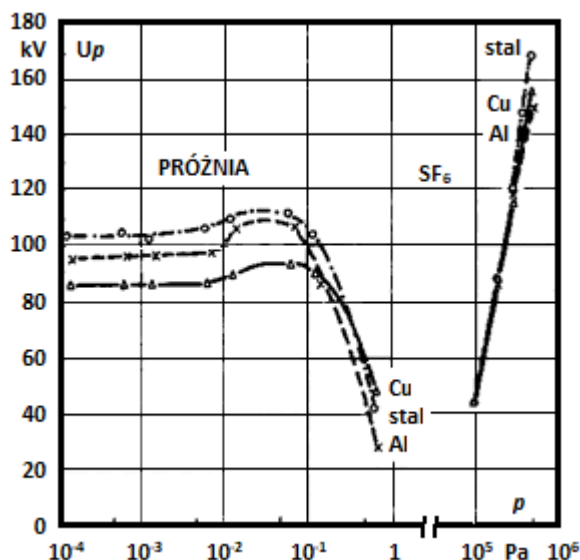
wartość stopniowo się podwyższa. W efekcie zastosowania takiego zabiegu, wskutek oddziaływania pola elektrycznego oraz występującego przy tym bombardowania jonami i elektronami powierzchni elektrod następuje destrukcja miejsc mających dobre właściwości emisyjne, tj. usuwanie mikrostrzy lub wygładzanie ich wierzchołków, usuwanie warstewek tlenków i innych zanieczyszczeń. W ten sposób wskutek długotrwałego oddziaływania pola elektrycznego uzyskuje się korzystny efekt usuwania słabych miejsc z powierzchni elektrod.

Układy izolacyjne z SF₆ nie wymagają stosowania kondycjonowania, gdyż pierwotna wartość napięcia przeskoku w tym układzie nie różni się więcej niż o kilka procent od wartości napięcia przeskoku po stabilizacji będącej wynikiem kondycjonowania [78].



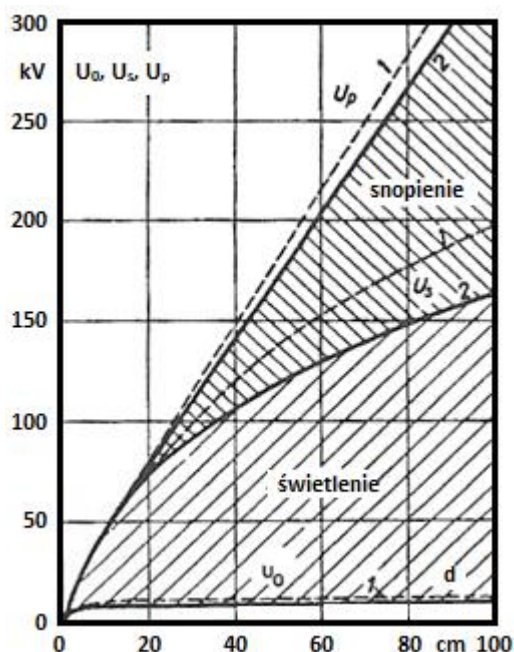
Rys. 2.6. Wpływ liczby przeskoków kondycjonujących na amplitudę napięcia przeskoku w próżniowym układzie izolacyjnym z elektrodami płaskimi wykonanymi z miedzi próżniowej przy cyklicznie zmienianej podczas pomiarów odległości elektrod d [83]

Na rysunku 2.7 [78] przedstawiono wyniki badań zależności wytrzymałości elektrycznej próżni oraz SF₆ od ciśnienia w temperaturze 293 K.



Rys. 2.7. Zależność napięcia przeskoku, przy napięciu przemiennym (amplituda) dla próżni oraz SF₆ od ciśnienia; temperatura 293 K, elektrody płaskie o średnicy 150 mm wykonane z różnych materiałów, odstęp między elektrodami 5 mm [78]

Wytrzymałość elektryczna gazowego układu izolacyjnego zależy również od rozkładu natężenia pola elektrycznego w przestrzeni międzyelektrodowej, który zależy od kształtu elektrod [83]. Ze zwiększeniem stopnia niejednorodności pola elektrycznego maleje napięcie przeskoku. Rozwój wyładowania elektrycznego w układzie z polem niejednorodnym przedstawia rysunek 2.8.



Rys. 2.8. Zależności napięcia początkowego ulotu U_0 , napięcia początkowego snopienia U_s oraz napięcia przeskoku U_p (wartości skuteczne napięcia przemiennego o częstotliwości 50 Hz) od drogi przeskoku dla iskiernika typu ostrze – ostrze w powietrzu atmosferycznym; 1 – przy symetrii napięciowej; 2 – przy uziemionym jednym zacisku źródła wysokiego napięcia [115]

W przypadku układów typu ostrze – płyta lub ostrze – ostrze, w których rozkład pola elektrycznego jest silnie niejednostajny, wzrost napięcia prowadzi początkowo, przy napięciu U_0 , do pojawienia się wyładowań niezupełnych. Dalszy wzrost napięcia powoduje przeskok – przy napięciu przeskoku U_p . Różnica między U_p a U_0 jest tym większa, im większy jest stopień niejednostajności pola elektrycznego (związany z promieniem zaokrąglenia elektrod ostrzowych). Jeśli napięcie doprowadzone do układu ma wartość U_0 lub nieco większą, to w pobliżu elektrod ostrzowych występuje wyładowanie niezupełne zwane wyładowaniem ulotowym lub koronowym. Emituje ono światło o stosunkowo małej jasności, czemu towarzyszy charakterystyczny szmer. Po dalszym wzroście napięcia wyładowania niezupełne skupiają się, tworząc kanaliki – tzw. wyładowania snopiaste. Jeśli napięcie dalej rośnie, następuje intensyfikacja wyładowań snopiastych i w końcu, przy napięciu U_p , dochodzi do przeskoku, w którym kanał iskrowy wyładowania łączy obydwie elektrody.

Czynniki związane z występowaniem powłoki dielektrycznej na powierzchniach elektrod układu izolacyjnego dzieli się na dwie kategorie [73]: czynniki, które korzystnie wpływają na wytrzymałość elektryczną badanego układu oraz na czynniki, które niekorzystnie wpływają na wytrzymałość elektryczną badanego układu.

Czynniki, które korzystnie wpływają na wytrzymałość elektryczną badanego układu, są:

- zmniejszenie wartości prądu elektronowego emisji polowej w układzie,
- zwiększenie współczynnika emisyjności promieniowania cieplnego powierzchni anody w porównaniu z analogicznym współczynnikiem wypolerowanego metalu elektrody.

Czynniki, które niekorzystnie wpływają na wytrzymałość elektryczną badanego układu są:

- zmniejszenie współczynnika odprowadzania ciepła wskutek przewodzenia,
- mniejsza powierzchnia obszaru anody bombardowanego wiązką elektronów emitowanych przez pojedynczy por dielektryku w porównaniu z powierzchnią obszaru bombardowanego przez wiązkę elektronów emitowanych z mikroostrza na anodzie,
- zwiększenie liczby i intensywności procesów wtórnych na anodzie spowodowanych bombardowaniem elektronami,
- możliwość inicjowania przeskoku przez przebicie powłoki dielektrycznej.

Przy zastosowaniu odpowiednio dobranej powłoki izolacyjnej, pokrywającej powierzchnie elektrod gazowego układu izolacyjnego, można podwyższyć wytrzymałość elektryczną przy napięciu przemiennym tego układu oraz zmniejszyć, nawet o dwa rzędy, wartość prądu elektronowego emisji polowej w porównaniu z układem z elektrodami bez powłoki.

Wybór powłoki izolacyjnej na powierzchnię elektrod układu izolacyjnego, która ma za zadanie podwyższenie napięcia przeskoku przy napięciu przemiennym, oprócz wszystkich wymagań, które powinny spełniać przedmiotowe powłoki pokrywające powierzchnię katody stosowane do podwyższania wytrzymałości elektrycznej przy napięciu stałym, dodatkowo powinna charakteryzować się wysoką temperaturą topnienia oraz dobrym przewodzeniem ciepła.

Znamiennym jest, że powłoka nie jest odporna na przeskoki występujące w układzie izolacyjnym. W większości przypadków pierwszy przeskok w układzie niszczy powłokę. W rezultacie tego procesu, wytrzymałość elektryczna układu obniża się do poziomu wytrzymałości układu z elektrodami bez powłoki, a często i poniżej tego poziomu.

2.2. WYŁADOWANIA ELEKTRYCZNE W WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADACH IZOLACYJNYCH Z ELEKTRODAMI POKRYTYMI POWŁOKAMI DIELEKTRYCZNYMI

Pierwsze badania próżniowych układów izolacyjnych, w których wykorzystano powłokę dielektryczną na powierzchni elektrody (katody) rozpoczęto w roku 1947 w Massachusetts Institute of Technology [35]. Prace te były kontynuowane przez kolejnych badaczy, którzy uzyskali wzrost wytrzymałości układu izolacyjnego przez pokrycie elektrod cienkimi warstwami fluorku magnezu, żywicy epoksydowej czy dwutlenku krzemu.

Autorzy prac [4, 38, 39, 83] wykazali, że powłoka dielektryczna pokrywająca powierzchnie elektrod powinna mieć następujące właściwości: dużą wytrzymałość elektryczną, dużą przenikalność elektryczną, rezystywność powyżej $10^8 \Omega \cdot m$, dobrą adhezję do metalu podłoża, dużą wytrzymałość mechaniczną i niskie ciśnienie par.

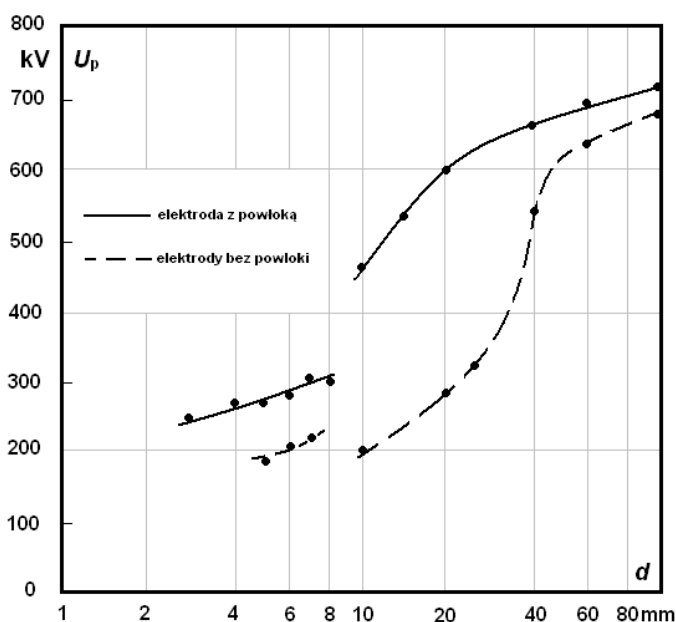
Dużą ilość badań układów izolacyjnych z katodami pokrytymi warstwą tlenku aluminium wykonali Rohrbach [95, 96] i Germin [32]. Pierwsze wyniki badań, w których wykorzystano powłoki z tlenku aluminium, żywicy epoksydowej i dwutlenku krzemu zawarto w [12, 62], a wyniki badań właściwości izolacyjnych z dielektrykiem na powierzchni elektrody przy bardzo wysokich napięciach (do 1000 kV) przedstawiono w [3, 4].

Badania wyładowań w wysokiej próżni pomiędzy kulistymi elektrodami wykonanymi ze stali nierdzewnej z naniesionymi na ich powierzchnie powłokami dielektrycznymi (poliuretan, żywica epoksydowa) przeprowadzone dla napięcia przemiennego i stałego opisano w [46].

Mniej popularnymi materiałami stosowanymi na powłoki izolacyjne są teflon i polimetakrylan metylu. Wyniki eksperymentów z tymi powłokami przedstawiono w [33]. Badania powłok dielektrycznych wykonano również dla układów elektrod wykonanych ze stopów miedzi [77].

Mimo różnorodności badań, różnych metod i zakresu badań, stwierdzono, że warstwa izolacyjna znajdująca się na powierzchni katody tłumi emisję elektronową połową tak, że wartość prądu elektronowego emisji połowej w układzie jest niższa o nawet trzy rzędy w porównaniu z wartością prądu w układzie izolacyjnym z elektrodami bez warstwy dielektrycznej (przy tym samym napięciu w obu przypadkach). Wobec tego napięcie w układzie rośnie. Ujemny wpływ na wytrzymałość elektryczną układu ma naniesienie dielektryku wyłącznie na anodę lub jednocześnie na obie elektrody. Zabieg taki silnie obniżał napięcie przeskoku, chociaż przy powłoce na obu elektrodach występowało silne tłumienie prądu elektronowego emisji połowej [38, 40].

Na rysunku 2.10 przedstawiono zależności napięcia przeskoku (napięcie przemienne) w układach izolacyjnych próżniowych, z elektrodami bez powłoki oraz z powłoką dielektryczną na katodzie, od długości przerwy międzyelektrodowej uzyskanych przez różnych autorów. Z uzyskanych zależności wynika, że za pomocą powłoki dielektrycznej naniesionej na powierzchnię elektrody można podwyższyć wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego próżniowego nawet dwukrotnie.



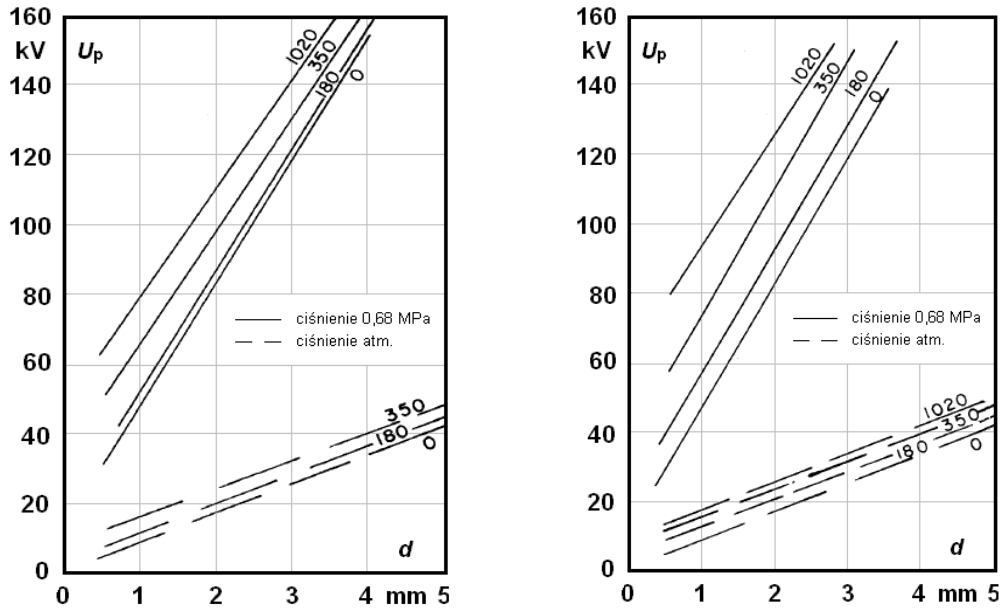
Rys. 2.10. Zależność napięcia przeskoku (napięcie przemienne), w układach izolacyjnych próżniowych, z elektrodami bez powłoki oraz z powłoką dielektryczną na katodzie, od długości przerwy międzyelektrodowej; ciśnienie $1,3 \cdot 10^{-4}$ Pa, średnica elektrod 20 cm [12]

W roku 1972 po raz pierwszy zastosowano pokrycie dielektrykiem obu elektrod w celu podniesienia wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego w układzie izolatora w próżni. Badania przeprowadzono przy napięciu przemianym i udarowym [66, 67, 99].

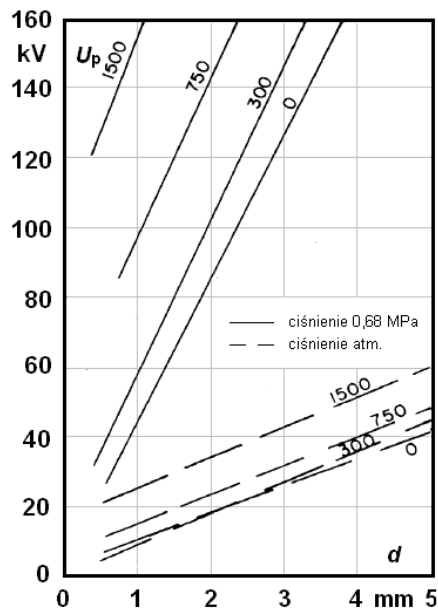
W pracach [34, 74, 75, 77, 79, 80, 84] głównym celem było znalezienie takiej powłoki, która po naniesieniu na powierzchnię elektrod spowoduje podniesienie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego próżniowego przy napięciu przemiennym. W badaniach zastosowano materiały dielektryczne wykonane z lakieru cykloalifatycznego Araldit oraz lakieru silikonowego. Powłoki te obniżały wytrzymałość układu izolacyjnego. Podwyższenie napięcia przeskoku przy napięciu przemiennym uzyskano przez pokrycie elektrod warstwą tlenku aluminium.

Wpływ powłok dielektrycznych na elektrodach gazowego układu izolacyjnego z sześćciofluorkiem siarki został opisany w pracach [110, 111]. Badanie te przeprowadzane były przy napięciu stałym i przemiennym oraz przy ciśnieniu atmosferycznym sześćciofluorku siarki oraz wynoszącym 0,34 MPa i 0,68 MPa. Układ izolacyjny o polu elektrycznym jednostajnym stanowiły elektrody płaskie o średnicy 150 mm i odległości między elektrodami wynoszącej od 1 do 5 mm. Miały one krawędzie o krzywiznie określonej według wzoru Bruce'a i były wykonane z aluminium [14]. W badaniach wykorzystywano elektrody pokryte warstwami poliuretanu, parafiny, lakieru epoksydowego oraz tlenku aluminium uzyskiwanego w procesie utleniania anodowego.

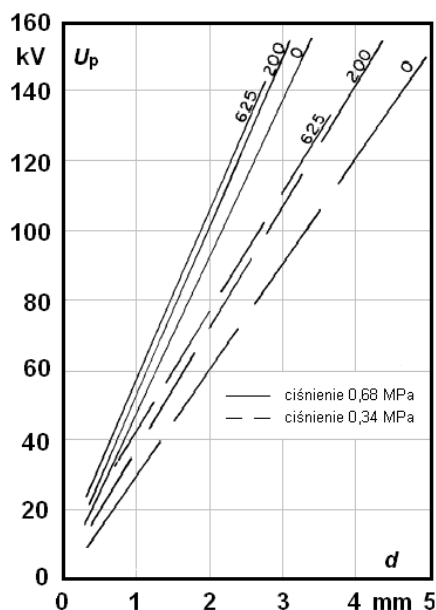
Autorzy badań postawili hipotezę, że to właśnie rezystywność zastosowanej powłoki odgrywa ważną rolę w mechanizmie inicjującym przeskok. Odpowiednią rezystywność cienkich powłok wykonanych z poliuretanu, parafiny i lakieru epoksydowego uzyskiwano dodając małe ilości proszku grafitowego. Ilość grafitu była tak ustalana, aby rezystywność powłoki została zmniejszona o około jeden rząd wielkości. Oceniono wpływ zanieczyszczeń w postaci wtrąconej cząsteczki grafitu do układu izolacyjnego (średnica mikrocząstki wynosiła około 100 μm). Na rysunkach 2.11, 2.12 i 2.13 przedstawiono zależność amplitudy napięcia przeskoku (napięcie stałe lub udarowe), w układzie z elektrodami gołymi oraz pokrytymi poliuretanem lub parafiną o różnej grubości, od odległości elektrod w SF₆, o różnym ciśnieniu.



Rys. 2.11. Zależność napięcia przeskoku (napięcie stałe), w układzie z elektrodami gołymi (0) oraz pokrytymi poliuretanem o różnej grubości, od odległości elektrod w SF₆, o ciśnieniu atmosferycznym i 0,68 MPa. Rezystywność powłok: $2,9 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ (a) lub $6,0 \cdot 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ (b). Grubość powłok w μm [110]



Rys. 2.12. Zależność amplitudy napięcia przeskoku (udar), w układzie z elektrodami gołymi (0) oraz pokrytymi parafiną o różnej grubości, od odległości elektrod w SF₆, o ciśnieniu atmosferycznym i 0,68 MPa. Grubość powłok w μm [110]

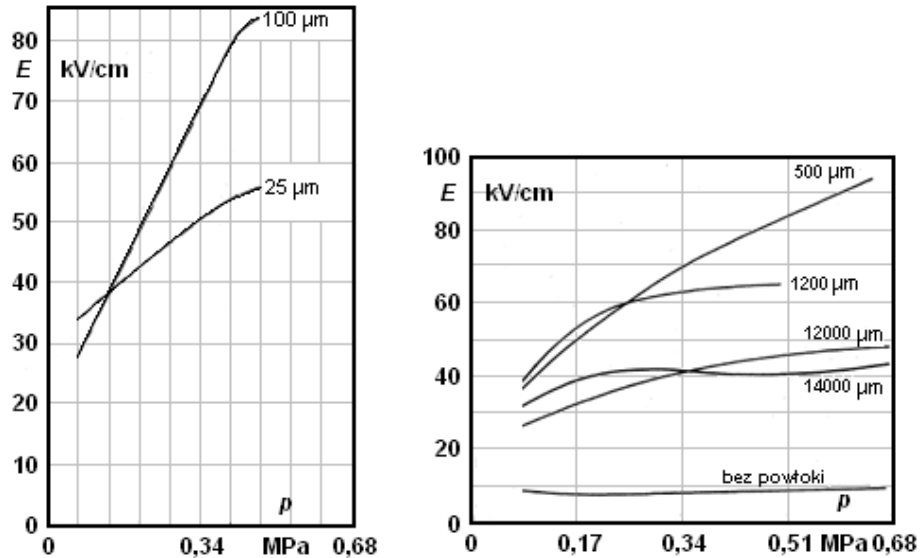


Rys. 2.13. Zależność napięcia przeskoku (napięcie stałe), w układzie z elektrodami gołymi (0) oraz pokrytymi żywicą epoksydową o różnej grubości, od odległości elektrod w SF_6 , o ciśnieniu 0,34 MPa i 0,68 MPa. Grubość powłok w μm [110]

W opracowaniu wyników badań zademonstrowano skuteczność powłok dielektrycznych. W badanym gazowym układzie izolacyjnym zaobserwowano wzrost wartości napięcia przeskoku wraz ze zwiększaniem grubości powłoki. Znaczną poprawę wytrzymałości elektrycznej, gdzie jako izolację zastosowano sześćfluorek siarki, zaobserwowano przy rezystywności powłoki powyżej $10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$. Pokrycie elektrod grafitem powodowało zwiększenie prądu poprzedzającego przeskok w układzie. Zastosowanie udarów napięciowych dla danego ciśnienia, grubości oraz rezystywności powłoki i odległości między elektrodami jest na ogół wyższa niż w przypadku wolnego zwiększania napięcia stałego. Zauważono, że po pierwszym przeskoku elektrycznym w układzie elektrod płaskich pokrytych cienką warstwą dielektryku, wartość napięcia przeskoku następnych prób była około 5-20% mniejsza niż dla pierwszego przeskoku. Obecność mikrocząstki w układzie izolacyjnym z elektrodami pokrytymi cienką warstwą dielektryczną nie wpływała na wytrzymałość układu gazowego. Ponadto w przypadku układu badanego napięciem stałym wzrost wytrzymałości był większy dla dwóch wyższych ciśnień. W przypadku układu badanego napięciem przemiennym uzyskano znaczny wzrost wytrzymałości dla wyższych ciśnień. Ponadto w układach badanych napięciem przemiennym, przy ciśnieniu atmosferycznym sześćfluorku siarki, zwiększanie grubości warstwy powłoki dielektrycznej nie dawało poważnego wzrostu wytrzymałości. Zaobserwowano również, że dla napięcia przemiennego osiąga się większy wzrost wartości napięcia przeskoku niż dla napięcia stałego w takich samych warunkach.

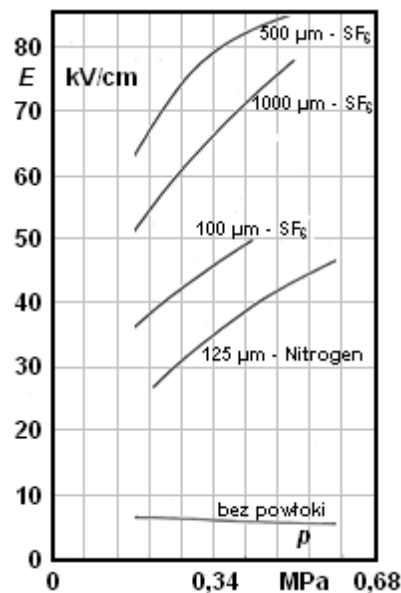
W pracy [111] przedstawiono badania wpływu metalicznych cząstek, traktowanych jako zanieczyszczenie w torach wielkopiętrowych z izolacją gazową (GIL – *Gas Insulated Line*) w zależności od ich kształtu, wielkości i lokalizacji. Takie cząstki mogą znacznie obniżyć wytrzymałość izolacji GIL. Eksperymenty przeprowadzone przez

autorów wskazują, że powłoki dielektryczne na powierzchniach elektrod wpływają na poprawę izolacji gazowej w stosunku do układu izolacyjnego z elektrodami bez powłok izolacyjnych. Układ izolacyjny stanowiły elektrody płaskie wykonane z aluminium pokryte cienką warstwą poliuretanu, żywicy epoksydowej i teflonu o średnicy 15 cm i 22 cm o krawędziach zaokrąglonych zgodnie ze wzorem Bruce'a. Wielkość metalicznych cząsteczek wynosiła od 1 mm do 3 mm. Badania przeprowadzono przy ciśnieniu SF₆ od 0 MPa do 0,68 MPa. Wyniki badan przedstawiono na rysunku 2.14 i 2.15.



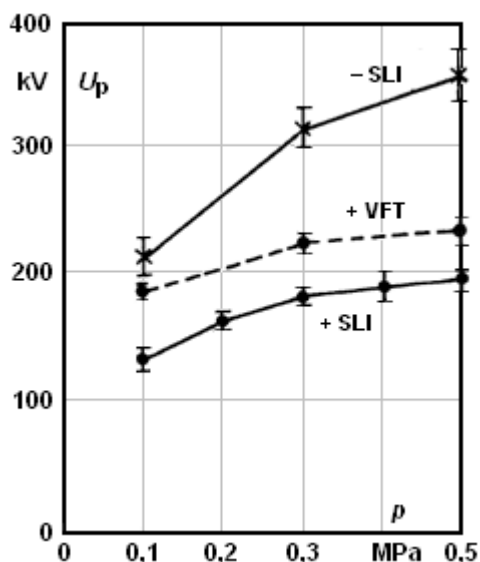
Rys. 2.14. Zależność natężenia pola (wartość skuteczna napięcia przemiennego), od ciśnienia SF₆; średnica metalicznej cząsteczki $d = 1,5$ mm; materiał powłoki: teflon (a) lub żywica epoksydowa (b) [111]

Podobne rezultaty badań uzyskali badacze w [118, 128, 129].



Rys. 2.15. Zależność natężenia pola (wartość skuteczna napięcia przemiennego), od ciśnienia SF₆ lub N₂; średnica metalicznej cząsteczki $d = 1,5$ mm; materiał powłoki: poliuretan [111]

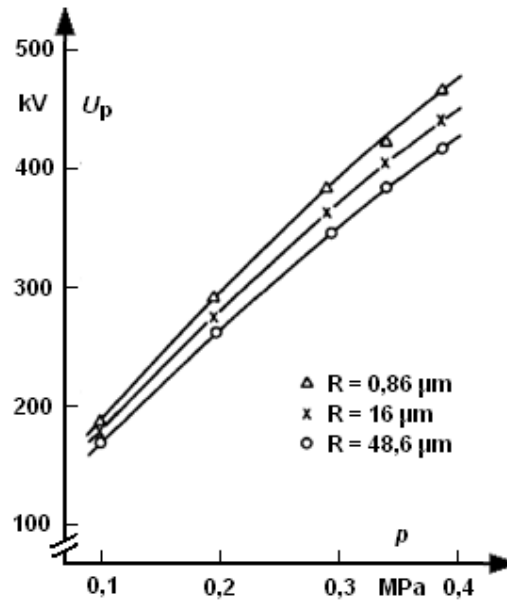
Badania zależności napięcia przeskoku przy udarze piorunowym prądu stałego szybko przemijającym $t < 1 \mu\text{s}$ (VFT – *Very Fast Transient*) oraz standardowym impulsem (SLI – *Standard Lightning Impulse*) o kształcie udaru 1,5/40 μs w układach izolacyjnych z SF₆, z elektrodami bez powłoki dielektrycznej oraz z naniesioną powłoką na powierzchnię elektrod, od długości przerwy międzyelektrodowej przedstawiono w [99, 100]. Elektrody w konfiguracji pręt-płyta (pole elektryczne niejednostajne). Badania potwierdziły, że na wartość napięcia przeskoku wpływa polaryzacja napięcia stałego oraz wartość ciśnienia w układzie izolacyjnym. Dodatkowo stwierdzono, że minimalne wartości napięć przebicia dla VFT są wyższe niż dla udarów napięciowych SLI. Na rysunku 2.16 przedstawiono zależność wartości szczytowej napięcia przeskoku dla udaru napięciowego szybkiego oraz standardowego, w układzie z elektrodami gołymi od ciśnienia SF₆ dla długości przerwy międzyelektrodowej wynoszącej 50 mm (dla polaryzacji dodatniej oraz ujemnej).



Rys. 2.16. Zależność wartości szczytowej napięcia przeskoku dla udaru napięciowego szybkiego (VFT) o czasie trwania $< 1 \mu\text{s}$ oraz standardowego (SLI) o kształcie udaru 1,5 / 40 μs , w układzie z elektrodami gołymi od ciśnienia SF₆. Długości przerwy międzyelektrodowej 50 mm. ●: dodatnia polaryzacja. ×: ujemna polaryzacja [101]

Doświadczalne badania wpływu chropowatości powierzchni elektrod na napięcie przeskoku (napięcie przemienne) w układach izolacyjnych z sześćfluorkiem siarki, z elektrodami bez powłoki dielektrycznej oraz z naniesioną powłoką na powierzchnię elektrod, od wielkości chropowatości powierzchni elektrod, dla zakresu ciśnienia gazu od 0,1 MPa do 0,4 MPa przedstawiono w [27, 71]. Elektrody wykonane były z miedzi i aluminium. Eksperymenty przeprowadzono dla wysokości profilu R_z (chropowatość) wynoszącej: 0,86 μm , 16 μm i 48 μm .

Na rysunku 2.17 przedstawiono zależność napięcia przeskoku (wartość skuteczna) w układzie z elektrodami płaskimi pokrytymi cienką warstwą tlenku aluminium od ciśnienia SF₆ dla długości przerwy międzyelektrodowej wynoszącej 5 mm.

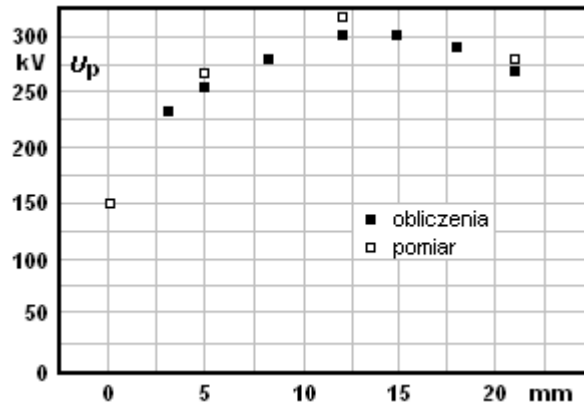


Rys. 2.17. Zależność napięcia przeskoku (wartość skuteczna) w układzie z elektrodami płaskimi pokrytymi cienką warstwą tlenku aluminium od ciśnienia SF_6 . Długości przerwy międzyelektrodowej 5 mm [71]

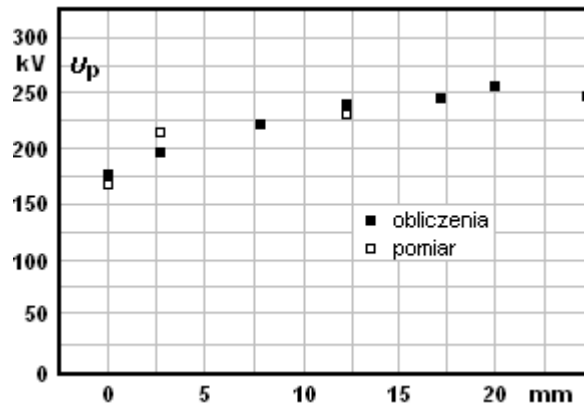
W przypadku elektrod wykonanych z aluminium i pokrytych cienkimi warstwami tlenku aluminium o innej grubości, nie zaobserwowano znaczącej poprawy wytrzymałości gazowego układu izolacyjnego dla grubszych warstw dielektrycznych. Wykonana powłoka tlenku aluminium ma zbliżoną wartość chropowatości powierzchni, bez względu na grubość powłoki. Tego samego typu badania, jednak przeprowadzone dla układu o polu jednostajnym opracowano w [48].

Badania właściwości wysokonapięciowych gazowych układów izolacyjnych dotyczyły nie tylko typowych układów wykorzystujących jako medium izolujące próżnię, sprężone powietrze czy SF_6 . Badano także układy, w których gazem elektroizolacyjnym był azot czy mieszaniny sześćfluorku siarki z innymi gazami [18, 49, 56, 63, 92, 98].

W badaniach opisanych w pracy [98] jako gaz elektroizolacyjny wykorzystano mieszanekę sześćfluorku siarki oraz azotu w proporcji 10% SF_6 i 90% N_2 . Stosowanie takiej mieszanki pozwala na podwojenie wytrzymałości izolacji w stosunku do czystego N_2 . Elektrody wykorzystywane w badaniach były pokrywane warstwą silikatu wypełnionego lakierem epoksydowym o różnych grubościach (3 mm i 30 mm). Badania przeprowadzano w układzie pręt-płyta i zmieniano stopień zaokrąglenia pręta ($r = 8$ mm lub $r = 16$ mm), długość przerwy między elektrodowej d , grubość powłoki elektroizolacyjnej oraz ciśnienie gazu p . W takich warunkach dokonywano pomiaru napięcia przeskoku. Ponadto dokonano obliczeń napięcia przeskoku i porównano wyniki z pomierzonymi. Wyniki badań i obliczeń uzyskane przez autorów tej pracy przedstawiono na rysunku 2.18 i 2.19.

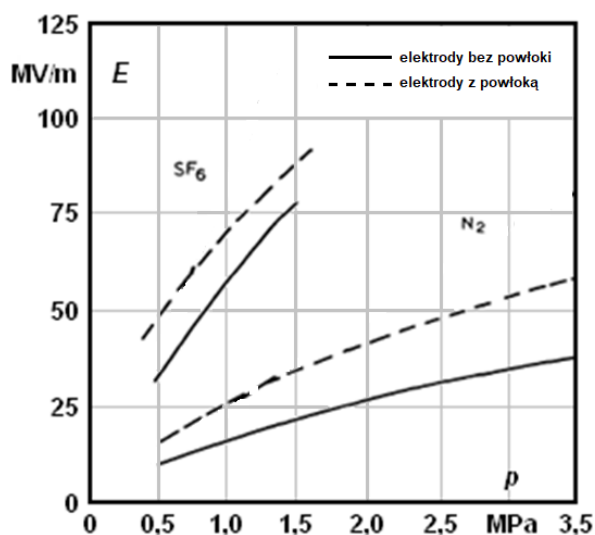


Rys. 2.18. Obliczona i zmierzona zależność napięcia przeskoku od grubości powłoki dielektrycznej dla promienia pręta 8 mm, odległości między elektrodami 28 mm i ciśnieniu gazu wynoszącym 300 kPa [98]



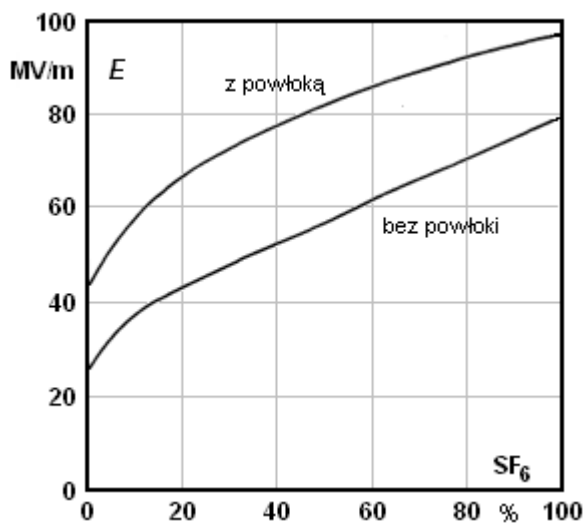
Rys. 2.19. Obliczona i zmierzona zależność napięcia przeskoku od grubości powłoki dielektrycznej dla promienia pręta 16 mm, odległości między elektrodami 38 mm i ciśnieniu gazu wynoszącym 200 kPa [98]

Kolejni badacze w pracach [18, 56, 63] potwierdzili, że stosowanie mieszaniny SF₆ z azotem w różnych proporcjach pozwala na zwiększenie wytrzymałości izolacji w stosunku do czystego SF₆ czy N₂. Badania przeprowadzane impulsem piorunowym potwierdziły, że wzrost natężenia pola elektrycznego przy pierwszym przeskoku zależy od rodzaju pokrycia elektrody. Grubość materiału izolacyjnego przy próbach udarowych nie miała wpływu na wytrzymałość układu, przy założeniu, że grubość ta nie jest wystarczająco duża w stosunku do wartości przebicia samego gazu. Na rysunku 2.20 przedstawiono zależność natężenia pola elektrycznego dla SF₆ oraz N₂ w funkcji ciśnienia dla różnego rodzaju powłok dielektrycznych na powierzchni katody.



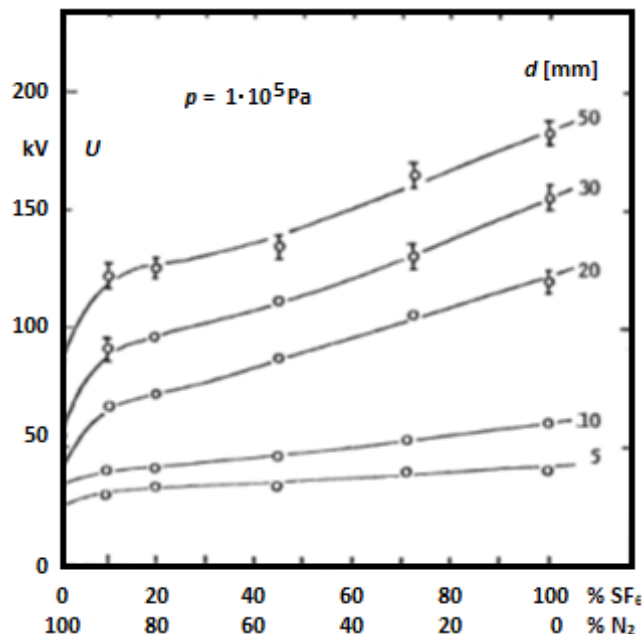
Rys. 2.20. Zależność natężenia pola elektrycznego dla SF_6 oraz N_2 w funkcji ciśnienia dla układu izolacyjnego bez i z powłoką dielektryczną na powierzchni katody; średnica elektrod 25 mm; odległość między elektrodami 2 mm [18]

Na rysunku 2.21 przedstawiono badania wpływu udziału sześćciofluorku siarki w mieszaninie SF_6 i N_2 w układach izolacyjnych z elektrodami bez powłok dielektrycznych i z cienką powłoką dielektryczną o grubości 0,13 mm wykonaną z nylonu naniesioną na powierzchnię elektrody.

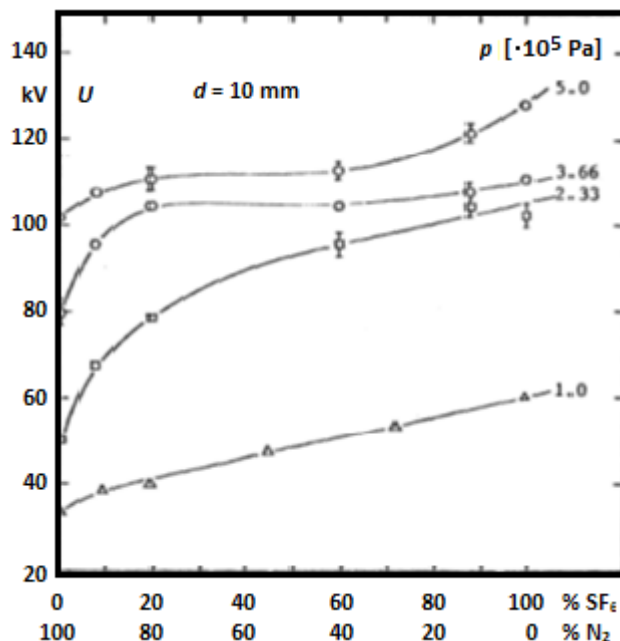


Rys. 2.21. Zależność natężenia pola elektrycznego dla mieszaniny SF_6 i N_2 w funkcji objętości SF_6 w układzie z elektrodami bez powłok dielektrycznych i z cienką powłoką dielektryczną o grubości 0,13 mm wykonaną z nylonu; średnica elektrod 25 mm; odległość między elektrodami 2 mm [18]

Kolejne prace wykorzystujące mieszaninę SF_6 i N_2 jako izolację wysokonapięciową przedstawiają wpływ procentowego udziału sześćciofluorku i azotu w mieszaninie w układach o różnej odległości międzyelektrodowej oraz przy różnym ciśnieniu [49, 91]. Na rysunku 2.22 przedstawiono zależność napięcia przeskoku (napięcie przemienne), od stosunku mieszaniny SF_6 i N_2 , dla różnej długości przerwy międzyelektrodowej. Na rys. 2.23 przedstawiono zależność napięcia przeskoku (napięcie przemienne), od stosunku mieszaniny SF_6 i N_2 , dla ciśnień w zakresie od $1 \cdot 10^5$ do $5 \cdot 10^5$ Pa (dla długości przerwy międzyelektrodowej $d = 10$ mm).



Rys. 2.22. Zależność napięcia przeskoku (napięcie przemiennie), od stosunku mieszaniny SF₆ i N₂, dla różnej długości przerwy międzyelektrodowej; ciśnienie 1·10⁵ Pa, średnica elektrod 12 cm [49]



Rys. 2.23. Zależność napięcia przeskoku (napięcie przemiennie), od stosunku mieszaniny SF₆ i N₂, dla ciśnień w zakresie od 1·10⁵ do 5·10⁵ Pa, długości przerwy międzyelektrodowej d = 10 mm, średnica elektrod 12 cm [49]

Badania przeskoku elektrycznego w analizowanej mieszaninie SF₆ oraz N₂, w układzie izolacyjnym płaszczyzna-pręt wykazały, że:

1. Dodanie 15% SF₆ do N₂ zwiększa wytrzymałość elektryczną nawet o 50%. Dalszy wzrost zawartości SF₆ powoduje mniejszy przyrost wytrzymałości elektrycznej uzyskanej mieszaniny. W szczególnych przypadkach zwiększenie zawartości SF₆ powyżej 85% (do 99%) powodowało częściowe obniżenie wytrzymałości układu.

2. Przy ciśnieniu około 200 kPa dla mieszanin złożonych z 10% SF₆ – 90% N₂ do 40% SF₆ – 60% N₂ wytrzymałość elektryczna układu izolacyjnego jest znacznie niższa niż dla 100% N₂. Dla ciśnień poniżej 2 bar maksymalną wytrzymałość elektryczną ma mieszanina składająca się z około 99,8% N₂ i 0,2% SF₆.

Badaniom wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych z elektrodami pokrytymi cienkimi warstwami dielektrycznymi poddawano również rzadziej spotykane mieszaniny gazów np. SF₆/R113 (trichlorotrifluoroethane) [91], C-C₄-F₈/SF₆, C-C₄F₈ [91] czy SF₆/N₂+CO₂ [18]. W powyższych pracach stosowano napięcia udarowe prądu przemiennego oraz stałego. Zakres ciśnień w badanych układach izolacyjnych był w zakresie od 0,5 MPa do 5 MPa. Przebadano wpływa kondycjonowania na gazowy układ izolacyjny. Zaobserwowano różny wpływ polaryzacji elektrod dla sześćofluorku siarki i azotu. Praca [92] potwierdziła wcześniejsze wyniki badań innych naukowców dotyczące około 30% zmniejszenia wytrzymałości gazowego układu izolacyjnego wskutek wprowadzenia do układu (na powierzchnię elektrody) mikrocząstki.

Głównym wnioskiem z przeprowadzonych badań wytrzymałości sprężonych gazowych układów izolacyjnych z powłoką dielektryczną na powierzchniach elektrod jest to, że cienkie warstwy izolacyjne naniesione na powierzchnie elektrod zwiększają wytrzymałość gazowego układu izolacyjnego. Jednak większość prac została ograniczona do stosowania napięć udarowych i to w stosunkowo wąskim zakresie zarówno materiałów jak i grubości powłok. We wszystkich tych badaniach przedstawiono czynniki, które przyczyniły się do poprawy właściwości izolacyjnych układu.

Badacze w swoich pracach stosowali głównie materiały na powłoki, które nie miały dużej wytrzymałości mechanicznej. Nie chroniły więc one powierzchni 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, przewodów osłoniętych można uznać za celowe.

2.3. ROZWÓJ WYŁADOWAŃ W GAZOWYCH UKŁADACH IZOLACYJNYCH

Wyładowanie elektryczne w gazie jest zespołem zjawisk fizycznych związanych z przepływem przez gaz prądu elektrycznego. W literaturze przedmiotu można znaleźć kilka kryteriów klasyfikacji wyładowań, m. in. kryterium, w którym mamy do czynienia z warunkiem podtrzymywania wyładowania oraz kryterium, w którym wyróżnikiem rodzaju wyładowań jest wartość rezystancji międzyelektrodowej, w której to wyładowanie występuje.

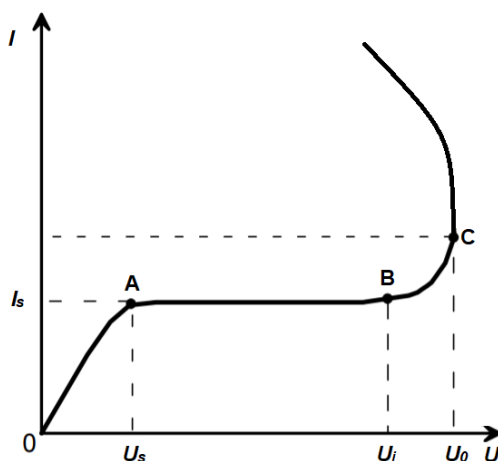
W przypadku kryterium dotyczącego warunku podtrzymywania wyładowania mamy do czynienia z wyładowaniem niesamodzielnym (niesamoistnym) lub wyładowaniem samodzielnym (samoistnym).

Za wyładowanie niesamodzielnne uważa się wyładowanie, które może zaistnieć tylko w obecności zewnętrznego czynnika zapewniającego pojawienie się nośników prądu (np. promieniowanie jonizujące). W przypadku wyładowań samoistnych, generacja nośników prądu elektrycznego związana jest z oddziaływaniem pola elektrycznego [82].

W przypadku kryterium dotyczącym wartości rezystancji międzyelektrodowej, w której występuje wyładowanie, dla wyładowań niesamodzielnnych mamy do czynienia z największymi wartościami rezystancji. Ulot, wyładowania snopiaste i ślizgowe są wyładowaniami o mniejszych wartościach rezystancji. Najmniejszymi wartościami rezystancji, dającymi małowrezystancyjne zwarcie, charakteryzują się wyładowania zupełne – iskra i łuk elektryczny. Należy mieć na uwadze, że powyższe rodzaje wyładowań mogą być wyładowaniami niesamodzielnymi – szczególnie wyładowania charakteryzujące się większymi wartościami rezystancji.

W celu wyjaśnienia działania mechanizmów wyładowań zachodzących w gazowym układzie izolacyjnym oprzeć się można na najprostszym układzie izolacyjnym złożonym z dwóch płaskich elektrod umieszczonych w gazie i oddalonych od siebie na pewną odległość.

Jeżeli do układu izolacyjnego zostanie przyłożone napięcie, które będzie stopniowo zwiększane, to uzyska się charakterystykę prądowo-napięciową (jonizacji). Na rys. 2.24 przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową gazowego układu izolacyjnego.



Rys. 2.24. Charakterystyka prądowo-napięciowa gazowego układu izolacyjnego [115]

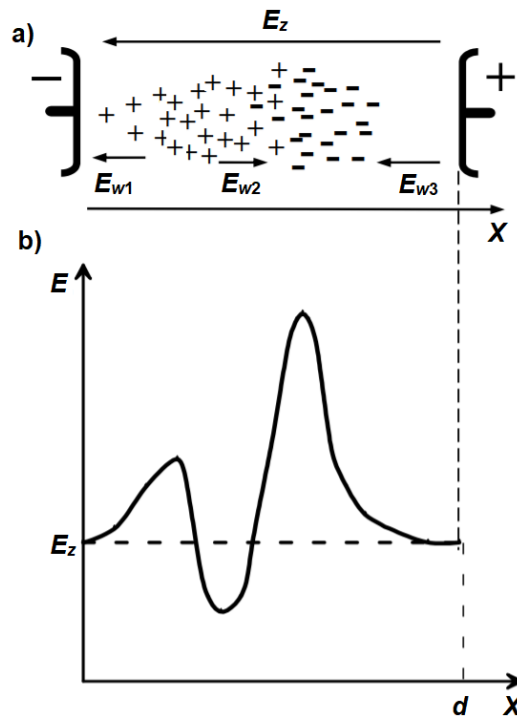
Naturalne promieniowanie jonizujące (kosmiczne lub ziemskie), które oddziałuje w sposób ciągły, powoduje, że w powietrzu zawsze znajduje się niewielka liczba ładunków swobodnych (jonów i elektronów). Na odcinku |0A| charakterystyka jest liniowa, liczba ładunków docierających do okładzin jest proporcjonalna do przyłożonego

napięcia. W tym zakresie obowiązuje prawo Ohma. Po osiągnięciu wartości (U_s), następuje stabilizacja, prąd na odcinku $|AB|$ osiąga stan nasycenia (I_s). Dalszy wzrost napięcia, pomimo wzrostu energii kinetycznej cząstek, nie powoduje zwiększenia prądu, ponieważ nie wzrasta liczba ładunków wytwarzanych przez zewnętrzne czynniki jonizujące. Energie cząsteczek nie są wystarczające do uruchomienia mechanizmów jonizacji powietrza. Począwszy od napięcia (U_j), elektrony uzyskują prędkości i energie, wystarczające do zapoczątkowania intensywnych procesów jonizacyjnych.

Zwiększenie wartości napięcia wywołuje wzrost prądu (odcinek $|BC|$) wynikający z jonizacji lawinowej. Wyładowanie ma tu jeszcze charakter wyładowania niesamoistnego. Po osiągnięciu napięcia (U_0), wyładowanie zmienia charakter na samoistne (punkt C). Od tego punktu wzrost prądu nie zależy od mechanizmów powstawania naładowanych cząstek, a jedynie od parametrów obwodu elektrycznego. Charakterystyka jonizacji jest nieodwracalna, co oznacza, że po przekroczeniu wytrzymałości elektrycznej powietrza następuje przeskok iskry w układzie. Dalszy rozwój wyładowania może przebiegać według różnych mechanizmów. Jak wspomniano w rozdziale 2, zależy to głównie od współczynnika niejednostajności pola, odległości elektrod d i ciśnienia gazu p . Wpływ mają również takie czynniki, jak: rodzaj gazu, biegunowość napięcia, zmiana napięcia w czasie. Można wyróżnić następujące mechanizmy rozwoju wyładowań w gazach:

- mechanizm Townsenda, występujący dla małych wartości iloczynu $p \cdot d$ ($10^2 \div 10^3$ hPa-cm) i
- mechanizm kanałowy, występujący w dwóch odmianach – strimerowej, przy średnich wartościach iloczynu $p \cdot d$ ($10^3 \div 10^5$ hPa-cm) i strimerowo-liderowej, zachodzącej przy dużych wartościach iloczynu $p \cdot d$ (większych od 10^5 hPa-cm).

W obydwu mechanizmach podstawowym elementem warunkującym rozwój wyładowania jest wystąpienie lawin elektronowych, w których zachodzi gwałtowny wzrost liczby elektronów. Rozkład ładunków w lawinie przedstawiono na rys. 2.25a. W czole lawiny znajdują się szybkie elektrony, z kolei w ogonie wolne jony dodatnie. Przy niewielkich odstępach między elektrodami (mechanizm Townsenda) ładunek przestrzenny jest zbyt mały i nie wpływa w istotny sposób na rozkład pola elektrycznego. Jeżeli odległości międzyelektrodowe są duże (mechanizm kanałowy), ładunek przestrzenny w lawinie jest przyczyną powstawania lokalnych pól wewnętrznych i zniekształcenia pola pierwotnego (rys. 2.25b).



Rys. 2.25. Wpływ ładunku przestrzennego na nierównomierność pola elektrycznego: (a) rozkład ładunków w lawinie elektronowej w polu jednostajnym, (b) rozkład natężenia pola elektrycznego; E_z – natężenie zewnętrznego pola elektrycznego, E_w – pole wywołane ładunkiem przestrzennym, d – odległość między elektrodami [115]

Mechanizm Townsenda oparty jest na założeniu, że jedynym wewnętrznym źródłem swobodnym elektronów jest emisja elektronów z katody (emisja wtórna jonowo-elektronowa), będąca skutkiem bombardowania katody przez jony dodatnie powstające przy formowaniu kawiny elektronowej w wyniku jonizacji zderzeniowej elektronowej. Ponadto, w mechanizmie tym zakłada się, że powstający ładunek przestrzenny między elektrodami nie zmienia w istotnym stopniu pierwotnego rozkładu pola elektrycznego [83].

Dalszy wzrost napięcia w układzie, w którym występuje wyładowanie niesamodzielne, powoduje, że istotną rolę we wprowadzaniu do przestrzeni międzyelektrodowej elektronów zaczynają odgrywać procesy wtórne, polegające na emisji elektronów z katody. Elektrony te są emitowane pod wpływem bombardowania katody jonami dodatnimi i atomami metastabilnymi oraz w wyniku fotoemisji pod wpływem fotonów promieniowania emitowanego podczas rekombinacji elektronów i jonów, a także procesu odwzbudzenia cząsteczek gazu.

Przy dużych wartościach iloczynu $p \cdot d$ rozwój wyładowania może zachodzić według mechanizmu kanałowego. Pojawiający się ładunek przestrzenny wpływa na zniekształcenie pierwotnego pola elektrycznego (rys. 2.25b). Następstwem jest nasilenie się jonizacji zderzeniowej w lawinie oraz zapoczątkowanie fotojonizacji wokół niej. Zjawisko fotojonizacji prowadzi do tworzenia się lawin wtórnych, które przy dostatecznie dużym polu, wzmocnionym przez ładunek przestrzenny, są wciągane w obszar lawiny pierwotnej. Rośnie liczba ładunków i temperatura gazu, spowodowane

zderzeniami sprężystymi, co jest czynnikiem sprzyjającym przekształceniu się lawiny pierwotnej w kanał plazmowy, tzw. strimer. Jest to silnie zjonizowany kanał, wypełniony elektronami i jonami dodatnimi.

Dotychczasowe publikacje dotyczące analizy mechanizmu Townsenda wykazały, że nie można jednoznacznie wyjaśnić bardzo krótkiego czasu rozwoju wyładowania prowadzącego do przeskoku, obserwowanego właśnie dla układów charakteryzujących się dużymi iloczynami $p \cdot d$ (powyżej 10^3 hPa·cm). Ten czas rozwoju jest około rząd wielkości krótszy aniżeli czas potrzebny do przelotu przez przerwę międzyelektrodową jonów dodatnich. Zatem w tych warunkach w rozwoju wyładowania nie mogą uczestniczyć procesy wtórne.

Dostępne wyniki badań [53] potwierdzają, że lawina elektronowa początkowo rozwija się zgodnie z mechanizmem Townsenda. Jednak, gdy rozwinię się już w przestrzeni międzyelektrodowej tak, że pole elektryczne jej ładunku przestrzennego będzie porównywalne z polem pierwotnym, wtedy wypadkowe natężenia pola elektrycznego przed czołem lawiny oraz za lawiną ulegają silnemu wzmocnieniu, a pole elektryczne w lawinie staje się słabsze. Ponieważ występujące w lawinie procesy rekombinacyjne i odzbudzeniowe są źródłem promieniowania, to zapoczątkowuje ono fotojonizację w bezpośrednim sąsiedztwie lawiny. W obszarach, gdzie natężenie pola elektrycznego osiąga największe wartości, fotojonizacja daje początek lawinom wtórnym. Lawiny wtórne mogą zatem występować zarówno przed, jak i za lawiną pierwotną.

W miarę rozwoju lawiny wtórne i lawina pierwotna łączą się ze sobą, tworząc strimer. Warunkiem rozwoju strimera jest osiągnięcie w czole lawiny krytycznej liczby elektronów n_k [83]:

$$n_k = n_0 \cdot e^{(\alpha \cdot x_k)}, \quad (2.1)$$

gdzie: x_k – krytyczna długość lawiny.

W mechanizmie strimerowym powstawanie lawiny pierwotnej i lawin wtórnych oraz ich przejście przez strimer nie zależy od procesów wtórnych na katodzie, a to oznacza skrócenie czasu rozwoju wyładowania.

2.4. METODY BADAŃ STANU IZOLACJI STAŁEJ W GAZACH

Uzyskanie informacji na temat stanu izolacji, a co za tym idzie stopnia zagrożenia dla poprawnego działania systemu izolacyjnego, pozwala na podjęcie prawidłowej decyzji dotyczącej wyłączenia z pracy uszkodzonego elementu. Posiadanie tej informacji umożliwia przeprowadzenie planowych, nie wymuszonych awaryjnych oraz najmniej kosztownych i uciążliwych remontów.

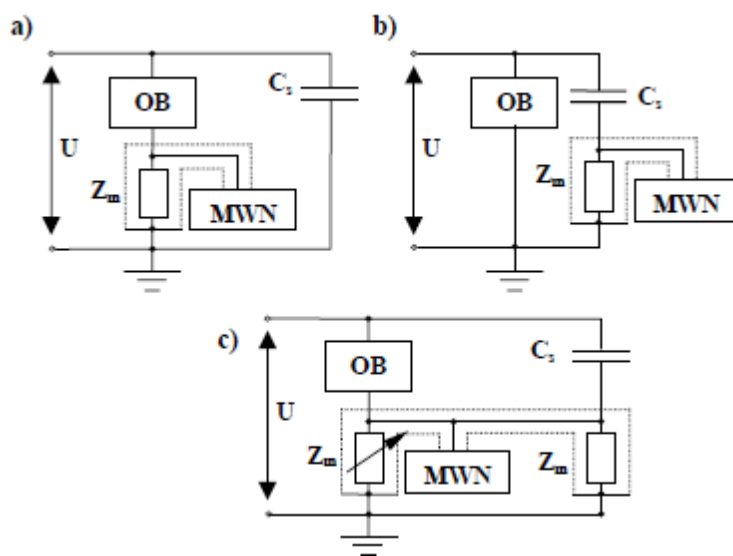
Dotychczas opracowano wiele różnych metod identyfikacji defektów czy uszkodzeń, między innymi: chemiczne, optyczne, akustyczne i elektryczne. Każda z nich ma zastosowanie w odniesieniu do specyficznych obiektów i warunków badań oraz może służyć wykrywaniu tylko pewnych rodzajów defektów. Metody chemiczne, na przykład bazujące na badaniu oleju pozwalają wywnioskować o lokalnym przegrzaniu, utożsamianym z punktowym defektem. Metoda termowizyjna, jako jedna z metod optycznych, pozwala wykryć dużą rezystancję przejścia we wszelkiego rodzaju urządzeniach, natomiast metoda fotograficzna pozwala wykryć tylko sam fakt występowania wyładowań niezupełnych w widocznym miejscu [64]. Właściwy dobór metody prowadzi do skutecznego rozpoznania charakteru uszkodzenia.

2.4.1. METODA KLASYCZNA, OPARTA NA POMIARZE WIELKOŚCI PODSTAWOWYCH CHARAKTERYZUJĄCYCH WNZ

Schemat podstawowego układu do detekcji wyładowań niezupełnych (wnz) przedstawia rysunek 2.27a [88, 114, 122]. Każde wyładowanie (wewnętrzne lub powierzchniowe) powoduje niewielki spadek napięcia na obiekcie badań OB. W wyniku tego z kondensatora sprzęgającego C_s do obiektu badań dopływa skokowo niewielki ładunek pozorny Q_p . Przepływ tego ładunku wymusza spadek napięcia ΔU na impedancji pomiarowej Z_m . Impuls ten jest wzmacniany i rejestrowany przez miernik wyładowań niezupełnych MWN. Pod wpływem tych zmian ze źródła dopływa do kondensatora uzupełniający ładunek, w wyniku czego do układu doprowadzona jest energia $Q_p U$. Zastosowany kondensator sprzęgający C_s powinien być wolny od wyładowań niezupełnych aby sam nie był ich źródłem i w ten sposób nie fałszował wyników pomiaru. Jako impedancję pomiarową Z_m stosuje się rezystor lub cewkę o odpowiednich wartościach. Zastosowanie cewki może jednak spowodować, że sygnał rejestrowany będzie miał charakter oscylacyjny.

W przypadku, gdy tych sygnałów jest wiele, mogą one się na siebie nakładać i wzajemnie znosić lub wzmacniać – dlatego zastosowania cewki nie zaleca się do oceny intensywności wnz. Natomiast z powodu dużej czułości, układ taki dobrze spełnia zadanie przy pomiarze napięcia początkowego wyładowań niezupełnych. Celowe jest w tym przypadku zastosowanie wzmacniacza o wąskim paśmie przenoszenia, nastrojonego na częstotliwość drgań własnych układu. Jeżeli podczas pomiaru wyładowań istnieje niebezpieczeństwo wystąpienia w obiekcie badanym przeskoków, wtedy w celu ochrony impedancji pomiarowej i przyrządu pomiarowego przed niedopuszczalnie wysokimi przepięciami należy zestawić układ równoległy według rysunku 2.27b. Układ równoległy ma zastosowanie także w przypadku, gdy obiekt badań ma jedną elektrodę trwale uziemioną. Jeżeli w miejscu pomiaru wnz występują duże zakłócenia zewnętrzne przenoszone przez fale elektromagnetyczne zaleca się

ekranowanie układu pomiarowego od wpływu obcych pól (np. klatka Faradaya) lub gdy jest to niemożliwe, należy zastosować układ mostkowy z rysunku 2.27 c. Metoda tradycyjna identyfikacji defektów opiera się na pomiarze napięcia początkowego wyładowań niezupełnych oraz wartości maksymalnego ładunku pozornego wyładowań i porównywaniu ich wartościami referencyjnymi zgromadzonymi w bazie danych [47]. Zupełnie pomijany jest oscylogram impulsów. Metoda ta nie daje zadowalających rezultatów – tylko w wyjątkowych przypadkach rozpoznanie defektu jest poprawne [87].



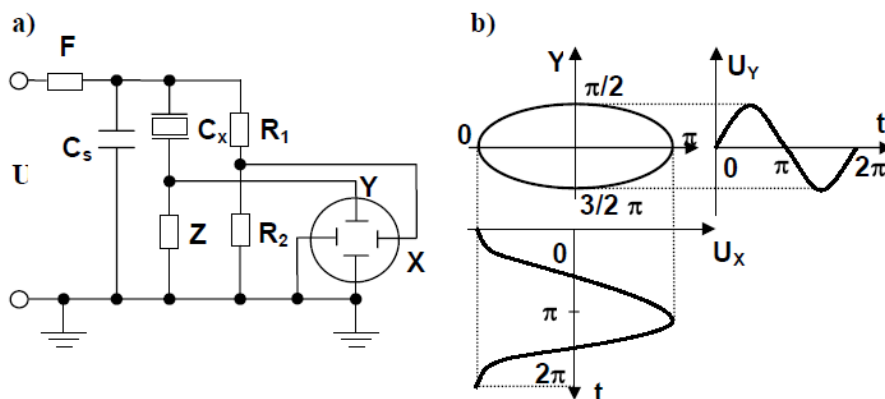
Rys. 2.27. Podstawowe układy do detekcji wyładowań niezupełnych: a) szeregowe połączenie impedancji pomiarowej z obiektem badanym, b) równoległe połączenie impedancji pomiarowej z obiektem badanym, c) układ mostkowy; OB - obiekt badany, Z_m – impedancja pomiarowa, C_s - kondensator sprzęgający, MWN – miernik wzn [114, 122]

2.4.2. METODA WYKORZYSTUJĄCA OBRAZ OSCYLOGRAFICZNY

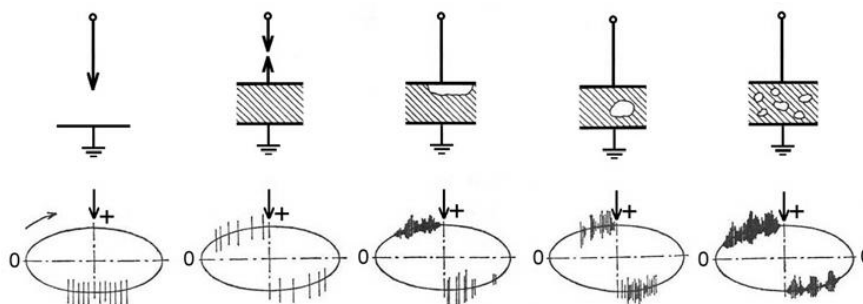
W celu przeprowadzenia badań zarówno próbki określonego dielektryka jak i całego układu izolacyjnego można wykorzystać metodę wykorzystującą obraz oscylograficzny. Do identyfikacji defektów najczęściej wykorzystuje się obraz oscylograficzny impulsów wyładowań niezupełnych na tle eliptycznej podstawy czasu [30, 114], która wynika z przesunięcia o $\pi/2$ napięcia na impedancji Z_m względem napięcia na rezystancji R_2 (rys. 2.28). Wielkościami porównywanymi, odnoszonymi do bazy danych, są: ładunek maksymalny wyładowań niezupełnych, napięcie zapłonu, napięcie gaśnięcia i przedział kątowy na eliptycznej podstawie czasu występowania wyładowań niezupełnych [30, 88, 100, 103].

Baza danych składa się z szeregu oscylogramów odpowiadających poszczególnym defektom (rys. 2.29 i rys. 2.30). Identyfikacja defektu polega na porównaniu zarejestrowanego przebiegu wyładowań w obiekcie badań z przebiegami znajdującymi

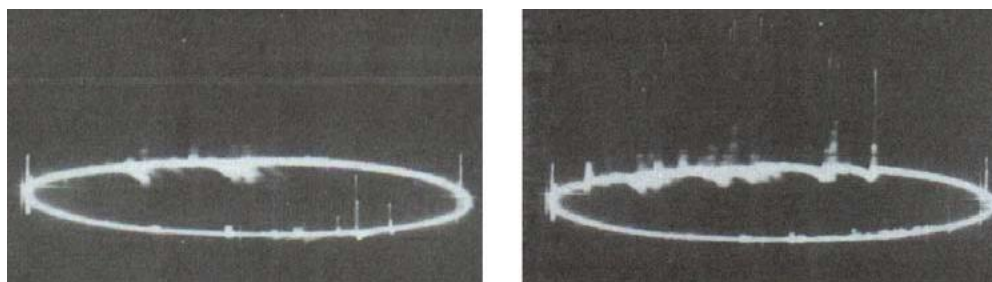
się w bazie danych. Ponieważ jest to czynność wykonywana przez człowieka, istnieje pewne prawdopodobieństwo złego rozpoznania defektu – tym większe im mniejsze jest doświadczenie osoby dokonującej identyfikacji.



Rys. 2.28. Metoda oscylograficzna badania wnz: a) schemat układu, b) przebiegi napięcia odchylającego X i Y oraz eliptyczny obraz podstawy czasu [30]



Rys. 2.29. Charakterystyczne przypadki wyładowań: a) ulot z ostrza w powietrzu; b) iskrzenie w obwodzie; c) wyładowania we wtrącinie przyelektrodowej; d) wyładowania w pojedynczej wtrącinie; e) wyładowania w licznych wtrącinach [30, 88]



Rys. 2.30. Przykładowe obrazy oscyloskopowe mikrowyładowań w komorze gaszeniowej wyłącznika próżniowego; a) mikrowyładowania przy odstępie elektrod $d=12$ mm, b) wyładowania ślizgowe po powierzchni bocznej osłony izolacyjnej [100]

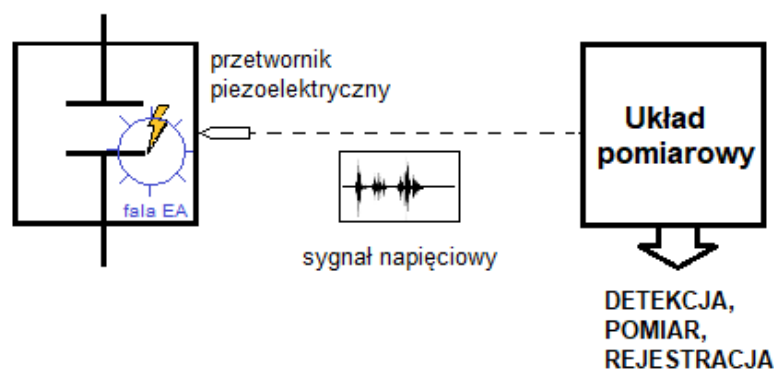
2.4.3. METODA EMISJI AKUSTYCZNEJ

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem – innym niż elektryczny sposób oceny stanu tego typu elektroizolacji – w odniesieniu do urządzeń elektrycznych z izolacją gazową i stałą jest metoda emisji akustycznej, która opiera się na pomiarach drgań i dźwięków generowanych przez materiał przez wyładowania niezupełne [1, 2, 37, 41, 71, 121, 124].

Metody akustyczne umożliwiają nie tylko wykrycie wyładowań niezupełnych, lecz także ich umiejscowienie. Podstawą metody elektroakustycznej (EA) jest analiza sygnału akustycznego generowanego przez wnz [57, 105, 106, 107, 108, 116]. Większość energii wyładowania niezupełnego zamieniana jest w energię elektryczną, cieplną i chemiczną. Przyjmuje się, że w czasie wyładowania niezupełnego następuje impulsowa przemiana części energii elektrycznej na energię mechaniczną, ze sprawnością 1-5%. Od strony fizycznej, pojedyncze wyładowanie niezupełne można porównać do mikroeksplozji, która ma miejsce w dielektryku. Przy założeniu, że wyładowanie niezupełne ma miejsce w ośrodku jednorodnym, można je traktować jak punktowe źródło zaburzeń sprężystych.

Poziom tych wyładowań można zmierzyć i przeanalizować na podstawie metody nieinwazyjnej, metody emisji akustycznej (EA) [2, 10, 23, 25]. Metoda ta jest stale rozwijana, a dzięki coraz bardziej wydajnemu sprzętowi pomiarowemu i zaawansowanym metodom analizy rejestrowanych sygnałów jego dokładność stale się poprawia [22, 61].

Na rysunku 2.31 przedstawiono schemat ideowy pomiaru sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wyładowania niezupełne.



Rys. 2.31. Schemat ideowy pomiaru sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wnz

Naukowcy wskazują na znaczący wpływ obecności wyładowań niezupełnych w diagnozowaniu gazowych układów izolacyjnych (GIS) [47, 64]. Ponadto można wykazać korelację między wynikami badań metodami elektrycznymi a pomiarami EA [106], zwłaszcza przy odpowiednim doborze deskryptorów sygnałów [105, 107]. Sztuczne sieci neuronowe są również wykorzystywane do analizy sygnałów EA [24, 117]. Można zauważyć, że takie tematy, jak obecność wnz w układach izolacyjnych

wysokiego napięcia [112], wpływ powłoki na osadzanie się łuku [113], poprawa parametrów elektrycznych za pomocą cienkich powłok dielektrycznych [29] i głównie zastosowanie metody EA z diagnostyką urządzeń wysokiego napięcia [125], zwłaszcza transformatory [15, 58] są obecnie w centrum zainteresowania badaczy.

Elektrody planarne stosowane w wysokonapięciowych systemach izolacji elektrycznej charakteryzują się występowaniem mikrowierzchołków, w których ze względu na lokalny wzrost pola elektrycznego dochodzi do emisji elektronów. Można podjąć próby zmniejszenia emisji poprzez obróbkę mechaniczną polegającą na dokładnym szlifowaniu tej powierzchni. Jednak nawet zastosowanie powyższego procesu nie gwarantuje wyeliminowania obecności emisji elektronów, tj. wnz.

3. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Projektowanie wszelkich urządzeń jest często zadaniem nietrywialnym i złożonym, zwłaszcza w przypadku, gdy mamy do czynienia z obiektami, w których występujące zjawiska fizyczne wzajemnie na siebie oddziałują. Z sytuacją taką mamy do czynienia przy konstruowaniu wysokonapięciowych gazowych układów izolacyjnych, w których zachodzi szereg zjawisk elektrycznych, termicznych i mechanicznych w ujęciu statycznym i dynamicznym.

Badania wytrzymałości sprężonych gazowych układów izolacyjnych z powłoką dielektryczną na powierzchniach elektrod badano w przeszłości. Głównym wnioskiem z przeprowadzonych badań, jest to, że cienkie warstwy izolacyjne naniesione na powierzchnie elektrod zwiększają wytrzymałość gazowego układu izolacyjnego. Jednakże, większość prac była ograniczona do użycia napięć udarowych i do względnie wąskiego zakresu materiałów pokrywających oraz ich grubości. Powody poprawy wytrzymałości elektrycznej gazowego układu izolacyjnego (SF_6 lub powietrze) oraz elektrodami pokrytymi warstwą izolacyjną, nie zawsze wyjaśniano.

Celem pracy jest analiza wpływu naniesionej na powierzchnię elektrod gazowego układu izolacyjnego warstwy dielektryku na wytrzymałość elektryczną tego układu i odporność powierzchni elektrod na uszkodzenia mechaniczne wywołane przez wyładowania występujące podczas pracy tego układu.

Autor rozprawy stawia tezę, że określone powłoki izolacyjne na powierzchniach elektrod gazowych układów izolacyjnych, mogą spowodować podwyższenie wytrzymałości elektrycznej tych układów i jednocześnie zwiększyć odporność powierzchni elektrod na uszkodzenia mechaniczne będące efektem wyładowania bądź spowodowane uderzeniem w powierzchnię elektrody.

Zakres pracy obejmuje:

- 1) budowę stanowiska pomiarowego do badania wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych,
- 2) badania wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych ze sprężonym powietrzem i sześciofluorkiem siarki,

- 3) określenie wpływu rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną badanych układów izolacyjnych,
- 4) dobranie materiału dielektrycznego na powłoki gazowego układu izolacyjnego,
- 5) badania mechanizmu inicjowania przeskoku w układach izolacyjnych z dielektrykiem na elektrodach, z wykorzystaniem metody emisji akustycznej,
- 6) sformułowanie wskazówek dla projektantów układów izolacyjnych prowadzących do zwiększenia wytrzymałości gazowych układów izolacyjnych.

4. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO I METODY BADAWCZEJ

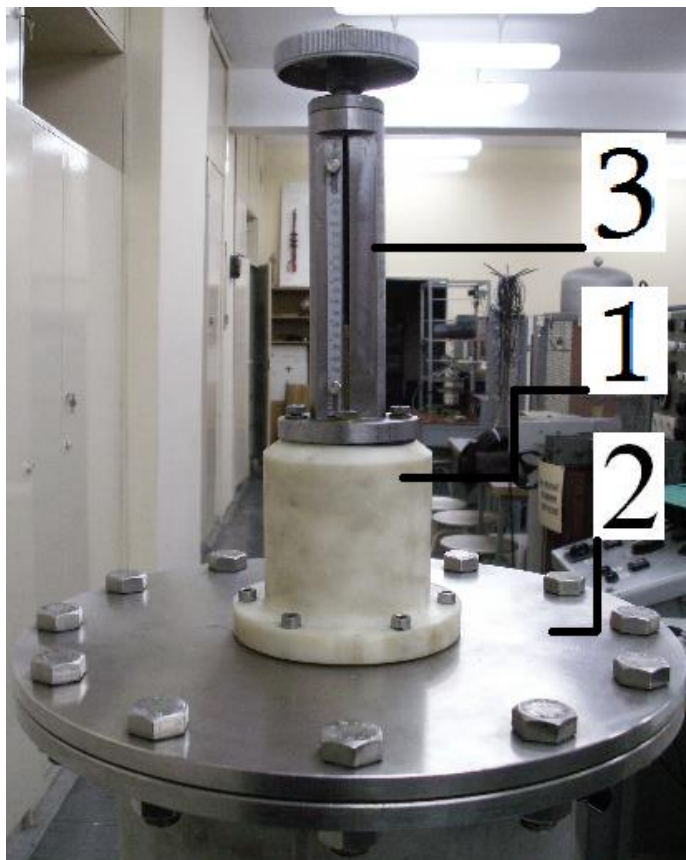
4.1. UKŁAD POMIAROWY

W badaniach gazowych układów izolacyjnych wykorzystano wykonaną ze stali nierdzewnej cylindryczną komorę o średnicy 40 cm i wysokości 70 cm. Na rys. 4.1 przedstawiono widok ogólny skonstruowanej komory. Korpus zamykany jest pokrywami górną, dolną i dwiema bocznymi uszczelnionymi gumowymi oringami. Zdjęcie pokryw bocznych zapewnia łatwy dostęp do wnętrza komory.



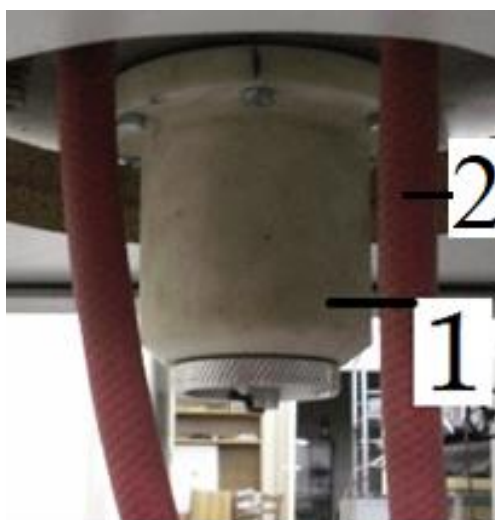
Rys. 4.1. Widok ogólny komory gazowej

Na pokrywach górnej i dolnej umieszczono izolatory przepustowe wykonane z teflonu. Na izolatorze górnym zamontowano układ regulacji przerwy międzyelektrodowej wraz z podziałką milimetrową (rys. 4.2). W pokrywie dolnej umieszczono przewody wprowadzające do komory badany gaz oraz umożliwiające dokonanie pomiaru ciśnienia wewnątrz cylindra.



Rys. 4.2. Widok górnej części komory; 1 – izolator przepustowy, 2 – pokrywa górna, 3 – układ regulacji przerwy międzyelektrodowej

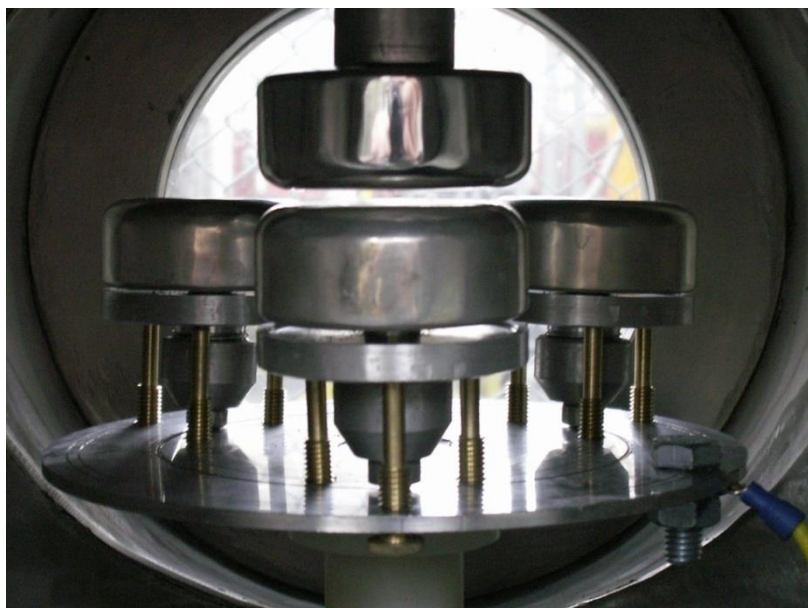
Na izolatorze przepustowym dolnym zamontowano pokrętło umożliwiające obrót podstawy elektrod umieszczonej wewnątrz komory (rys. 4.3).



Rys. 4.3. Widok dolnej części komory: 1 – izolator przepustowy, 2 – przewody gazowe

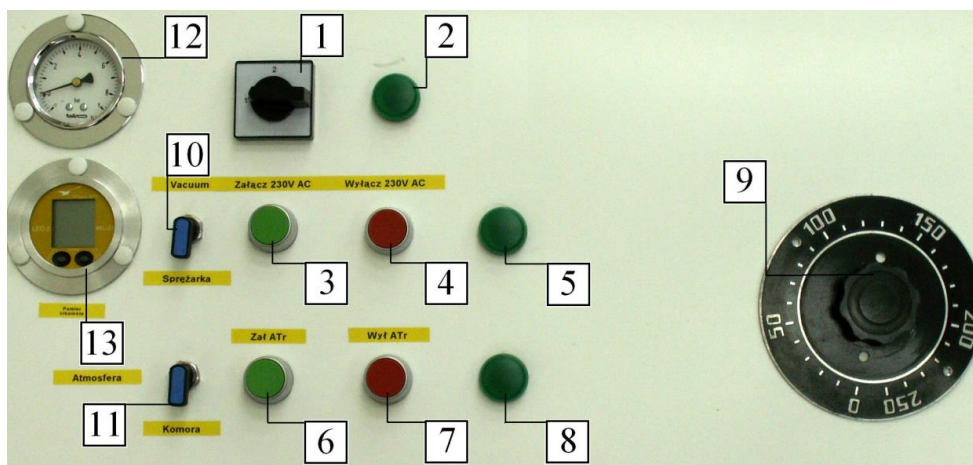
Na izolatorze przepustowym dolnym zamontowano pokrętło umożliwiające obrót podstawy elektrod umieszczonej wewnątrz komory (rys. 4.4). Umożliwiło to zmianę

badanych elektrod bez konieczności otwierania komory i wymiany gazu (jednoosiowość elektrod). Takie rozwiązanie konstrukcyjne komory umożliwiło jednoczesne umieszczenie trzech badanych elektrod.



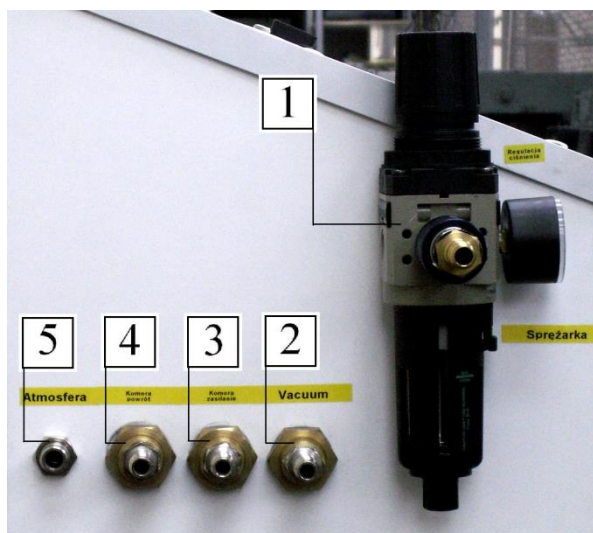
Rys.4.4. Widok podstawy elektrod wewnątrz komory ciśnieniowej

Układ sterowania zawiera podzespoły elektryczne oraz pneumatyczne, które pozwalają na kontrolę parametrów badanego układu oraz na odczytanie wyników pomiarów. Na rys. 4.5 przedstawiono widok układu sterowania stanowiskiem badawczym.



Rys. 4.5. Widok układu sterowania: 1. Włącznik główny układu sterowania elektrycznego, 2. Lampka sygnalizacyjna zasilania, 3. Przycisk załączający napięcie w gnieździe wtyczkowym 230 V, 4. Przycisk wyłączający napięcie w gnieździe wtyczkowym 230 V, 5. Lampka sygnalizacyjna gniazda wtyczkowym 230 V, 6. Przycisk załączający autotransformator, 7. Przycisk wyłączający autotransformator, 8. Lampka sygnalizacyjna autotransformatora, 9. Pokrętło regulacyjne autotransformatora, 10. Zawór przelączania zasilania sprężarka/pompa próżniowa, 11. Zawór wyrównania ciśnienia z atmosferą, 12. Manowakuometr analogowy – pomiar zgrubny, 13. Manowakuometr cyfrowy – pomiar dokładny

Sprężone powietrze oraz sześćiofluorek siarki włączano do komory poprzez filtr z silikazelem oraz reduktor ciśnienia z filtrem i zaworem szybkiego upustu. Filtry stosuje się w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń gazów. Na rysunku 4.6 przedstawiono widok reduktora ciśnienia z filtrem oraz szybkozłącza pneumatyczne.



Rys. 4.6. Widok reduktora ciśnienia i zaworów typu szybkozłącze: 1. Reduktor ciśnienia z filtrem i zaworem szybkiego upustu – miejsce podłączenia sprężarki, 2. Miejsce podłączenia pompy próżniowej, 3. Miejsce podłączenia komory ciśnieniowej, 4. Powrót z komory ciśnieniowej – pomiar ciśnienia, 5. Upust do atmosfery

Część pneumatyczna układu sterowania zawiera elementy pozwalające na sterowanie przepływem gazu zasilającego komorę ciśnieniową. Układ można zasilic 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.

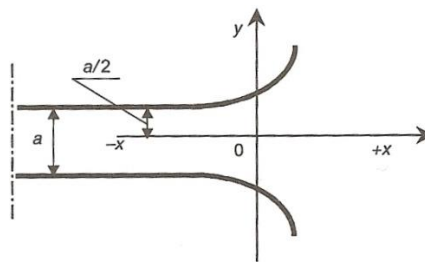
Układ izolacyjny tworzyły elektrody płaskie o średnicy 50 mm. Miały one krawędzie o krzywiznie określonej według wzoru Rogowskiego i były wykonane z miedzi próżniowej, aluminium, stali nierdzewnej oraz brązu. Krzywizna krawędzi elektrod miała wyeliminować zjawiska związane z efektami krawędziowymi.

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

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

4.2. PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI ELEKTROD ORAZ KONTROLA ICH STANU

Aby otrzymać jednostajny rozkład pola elektrycznego, w układzie elektrod płaskich o odstępzie d , należało odpowiednio ukształtować krawędzie elektrod dla uniknięcia zwiększenia na nich natężenia pola (rys. 4.7) [31]. Układ ten charakteryzuje (w pewnym zakresie odległości elektrod) wyraźna granica napięciowa, przy której następuje przeskok, nie poprzedzona wyładowaniami niezupełnymi.



Rys. 4.7. Kształt krzywizny powierzchni elektrod płaskich ukształtowanych według wzoru Rogowskiego [31]

Specjalne kształtowanie powierzchni elektrod według wzoru Rogowskiego [31]:

$$y = \frac{a}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + e^{\frac{\pi \cdot x}{a}} \right), \quad (4.1)$$

umożliwia eliminację krawędziowego wzmocnienia pola elektrycznego. Wówczas współczynnik niejednostajności rozkładu pola [31]:

$$\beta = \frac{E_m}{E_{sr}} = 1, \quad (4.2)$$

gdzie: E_m – maksymalne natężenie pola elektrycznego; E_{sr} – średnie natężenie pola elektrycznego.

Do badań zastosowano elektrody płaskie, które posiadały krawędzie o krzywiznie określonej według wzoru Rogowskiego i były wykonane z miedzi próżniowej (OFHC), aluminium (99,95%), stali nierdzewnej (H18N9) oraz brązu (CuSn10).

Elektrody przed umieszczeniem w układzie poddano starannej obróbce. Odpowiednią chropowatość powierzchni próbki przed procesem osadzania powłoki uzyskano, stosując obróbkę ścierną w operacjach szlifowania, dogładzania, docierania i polerowania. W omawianym przypadku wymaganą chropowatość powierzchni uzyskano, stosując obróbkę ścierną w operacjach szlifowania wykańczającego oraz polerowania. Zastosowano polerowanie tarczami ściernymi o gramaturze papieru od 200 do 3000 w emulsji chłodząco-smarującej, a następnie polerowanie tarczami polerskimi w emulsji karborundowej do lustrzanego połysku stopniowo. Następnie elektrody kilkakrotnie myto w wodzie destylowanej, acetonie i alkoholu etylowym używając płuczki ultradźwiękowej.

Powłoki tlenkowe na powierzchniach wypolerowanych elektrod aluminiowych uzyskiwano w następujący sposób: najpierw elektrody wytrawiano przez 1 minutę, w 30% roztworze wodorotlenku potasu (KOH), a następnie starannie płukano w wodzie destylowanej. Warstwę tlenku aluminium na powierzchni elektrody aluminiowej otrzymywano w procesie utleniania anodowego w 20% roztworze kwasu siarkowego (H_2SO_4) o temperaturze 293,15 K (kąpiel o średniej zdolności rozpuszczania powłoki; kwas siarkowy przenika do powłoki, powiększa pory i reagując z ich częścią denną powoduje ich pogłębianie). W tym procesie druga elektroda była wykonana z ołowiu. Zmieniając gęstość prądu płynącego podczas utleniania anodowego oraz czas trwania utleniania uzyskiwano zadane powłoki tlenkowe. Zastosowany roztwór H_2SO_4 ma wysoką przewodność elektryczną i nie wymaga stosowania zbyt wysokich napięć. Warunki fizykochemiczne procesu otrzymywania warstwy tlenku aluminium na elektrodach aluminiowych metodą utleniania anodowego przedstawiono w tabeli 4.1.

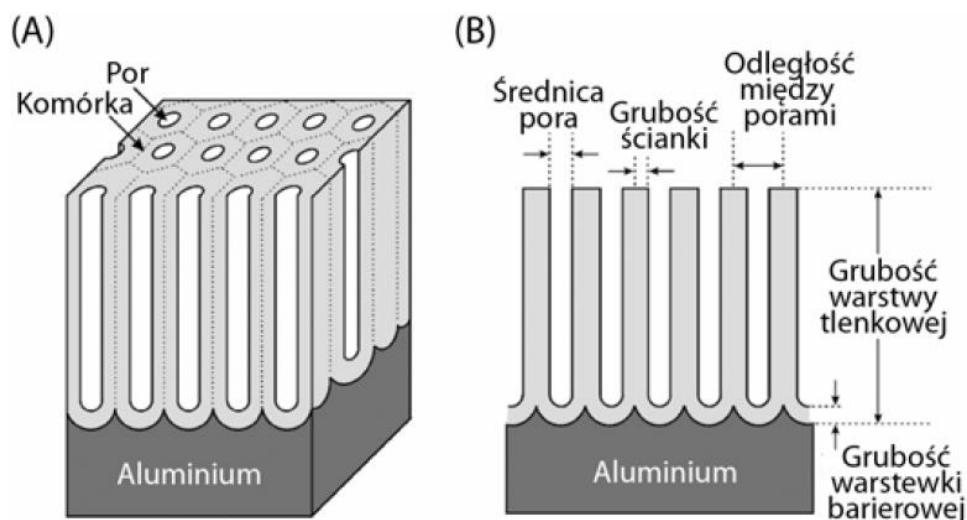
TABELA 4.1

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
A	5÷10	20% H_2SO_4	200	600	293
B	12÷16	20% H_2SO_4	400	600	293
C	14÷19	20% H_2SO_4	200	1800	293

Powstała warstwa, wytworzona sztucznie jest trwalsza niż utworzona w sposób naturalny [90]. W wyniku procesu technologicznego anodowania należy liczyć się z powstawaniem struktury hydrargilitu [76]. Stwierdzono, że na początku utleniania anodowego aluminium powstaje stosunkowo cienka i bardzo twarda warstewka zaporowa, na której wyrastają sześciokątne słupy w środku puste. Wielkość tych pustych przestrzeni albo porów decyduje w istotnym stopniu o jakości powłoki. Stwierdzono, że nie zależy ona od napięcia formowania, a jedynie od rodzaju stosowanej kąpeli. Grubość

warstewki zaporowej i grubość ścianek porów zależy przede wszystkim od napięcia elektrolizy. Na rysunku 4.8 przedstawiono schemat struktury porowatej warstewki tlenkowej otrzymywanej w procesie anodowego utleniania aluminium.



Rys. 4.8. Schemat struktury porowatej warstewki tlenkowej otrzymywanej w procesie anodowego utleniania aluminium: (A) - warstwa porowata, (B) - warstwa zaporowa

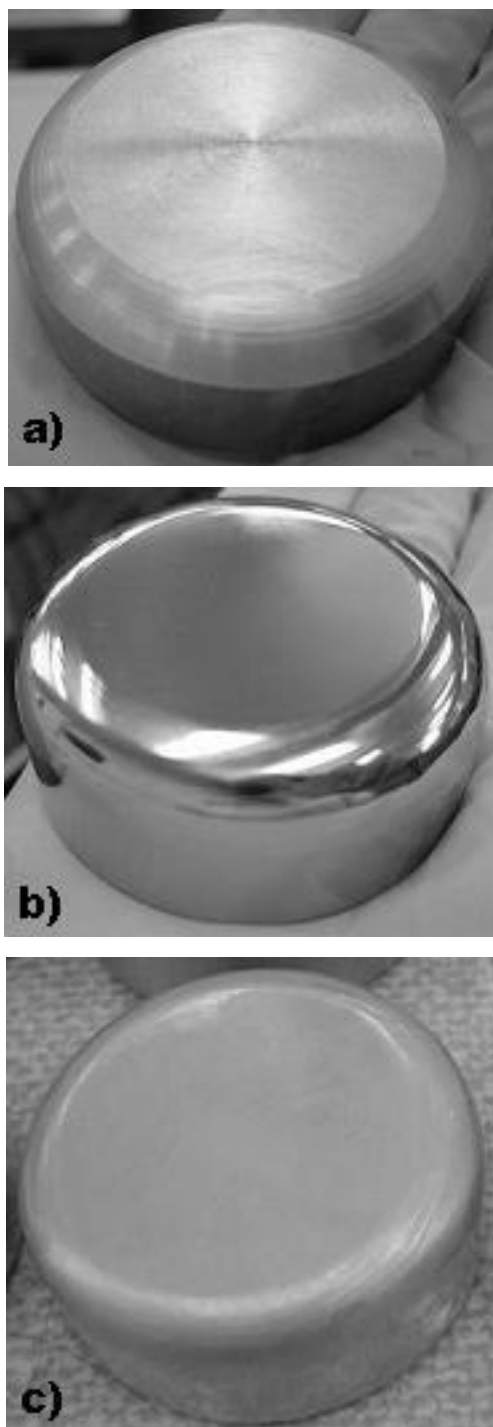
Powstała powłoka tlenkowa wykazuje pewną porowatość, która zmniejsza odporność korozyjną anodyzowanego aluminium. Dlatego po etapie utleniania anodowego należy otrzymane powłoki tlenkowe naniesione na elektrody poddać uszczelnianiu (wypełnianiu). Po utlenianiu anodowym elektrody były starannie płukane w wodzie destylowanej.

Warstwę tlenku na powierzchniach utwardzano przez trzyminutowe gotowanie elektrody w wodzie destylowanej i suszono w suszarce w temperaturze 383,15 K przez 600 s. W wyniku tego zabiegu następuje wypełnienie porów. W porach powstają hydraty $Al_2O_3 \cdot H_2O$, które zasklepiając pory, skutecznie uszczelniają powłokę. W wyniku tego całego procesu uszczelniania następuje również zablokowanie porów fazą stałą i mostkowanie obszarów, na których nie wytworzyła się ze względu na wady powierzchniowe ciągła powłoka tlenkowa.

Podczas uszczelniania warstwa tlenkowa zmienia swą budowę – tworzy się uwodniony tlenek $Al_2O_3 \cdot H_2O$. Równocześnie reakcji tej towarzyszy pęcznienie, przyłączenie wody krystalizacyjnej i zmiany w sieci krystalicznej, które prowadzą do zamknięcia porów i wytworzenia bardzo gładkiej powierzchni. Substancje zaabsorbowane przez powłokę są w niej "uwięzione" i nie można ich usunąć bez zniszczenia powłoki. Dodatkowo nasycono powłoki Al_2O_3 cienką warstwą materiału elektroizolacyjnego. W badaniach zastosowano trzy rodzaje lakierów poliuretanowych oraz dwie elastyczne powłoki silikonowe nanoszone techniką natryskową. Zastosowane materiały są szybkoschnącymi lakierami przeznaczonymi do zabezpieczania elementów elektrycznych, w szczególności tych narażonych na wilgotność oraz przystosowane są do pracy w szerokim zakresie temperatur. Pełne właściwości ochronne oba materiały uzyskują po całkowitym

utwardzeniu. Bazując na wysokiej jakości żywicach silikonowych, lakiery wykazują doskonałą przyczepność do całej gamy różnych materiałów.

Na rysunku 4.9 przedstawiono wygląd elektrod w poszczególnych etapach ich przygotowania.



Rys.4.9. Wygląd elektrod w poszczególnych etapach przygotowania: a) po procesie obróbki skrawaniem, b) po procesach polerowania i płukania, c) widok elektrody z naniesioną warstwą tlenku aluminium

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania wpływu materiału elektrod oraz powłok dielektrycznych na ich powierzchniach na wytrzymałość elektryczną

gazowych układów izolacyjnych. Badaniom poddano elektrody wykonane z aluminium, mosiądzu, oraz stali nierdzewnej.

Po dokonaniu pomiarów napięcia przeskoku w poszczególnych konfiguracjach elektrod przeprowadzono ocenę stanu powierzchni elektrod za pomocą mikroskopu LEXT firmy Olympus.

LEXT jest systemem konfokalnym do pomiarów i trójwymiarowej analizy powierzchni z wysoką rozdzielczością, przy wykorzystaniu lasera UV. Laserowy konfokalny skaningowy mikroskop LEXT, przeznaczony jest do precyzyjnych pomiarów, spełniający najwyższe standardy dokładności i powtarzalności. Do pracy z mikroskopem LEXT nie jest wymagane specjalne przygotowanie próbki, może ona być umieszczona bezpośrednio na stoliku mikroskopowym. Obserwacje i pomiary w trzech wymiarach są możliwe w czasie rzeczywistym. Analiza materiałów wykonywana jest szybciej i z większą dokładnością niż za pomocą konwencjonalnych mikroskopów optycznych [130]. Na rysunku 4.10 przedstawiono stanowisko badawcze umożliwiające ocenę stanu powierzchni elektrod.



Rys. 4.10. Stanowisko badawcze – mikroskop LEXT firmy OLYMPUS [44]

W systemie LEXT poszerzono granice rozdzielczości optycznej dzięki połączeniu światła UV z technologią skanowania konfokalnego. Długość fali światła laserowego wynosi 408 nm, a dzięki wykorzystaniu specjalnej optyki, która minimalizuje aberracje powstające w zakresie fal krótkich oraz maksymalizuje transmisję w zakresie 408 nm, uzyskuje się wysoką jakość obrazu i transmisję sygnału.

Zdolność rozdzielcza została podwyższona dzięki zastosowaniu techniki skanowania konfokalnego. W tej metodzie powierzchnia próbki jest skanowana punkt po punkcie.

Do detekcji sygnału wykorzystuje się fotopowielacz, a przed nim umieszcza przesłonę konfokalną, która odcina światło odbite od powierzchni i pochodzące spoza płaszczyzny ostrości. Fotopowielacz mierzy intensywność światła w każdym punkcie.

Informacja trójwymiarowa z kolejnych powierzchni jest uzyskiwana poprzez ruch obiektu w osi „z”. pozycja w osi „z” jest mierzona z dużą precyzją. Utworzona w ten sposób mapa intensywności służy do rekonstrukcji próbki w obraz przestrzenny 3D. kontrola ruchu w osi „z” jest niezwykle precyzyjna dzięki układowi liniowemu z 5 nm przyrostem. Dla każdej oglądanej powierzchni obliczana jest krzywa intensywności zwana krzywą „IZ” oparta na zaawansowanej analizie wartości maksymalnej intensywności. Rezultatem zastosowanych rozwiązań jest najlepsza dostępna rozdzielczość w płaszczyźnie wynosząca 0,12 μm oraz 0,01 μm w osi „z”.

W porównaniu do liniowego analizatora porowatości LEXT umożliwia pomiary nie tylko w jednej linii ale również na całej powierzchni. Precyzyjne zdefiniowanie obszaru pomiarowego może być wykonane bezpośrednio na ekranie monitora. Interpretacja pomiaru porowatości przebiega dużo łatwiej, ponieważ można wyświetlić trójwymiarowy obraz powierzchni. Po zapisaniu danych obrazowych z próbki w dalszej analizie powierzchni wykorzystać można wszystkie dostępne parametry pomiarowe takie jak: wysokość, odległość, kąt, objętość, które w łatwy sposób mogą być wykorzystane do dalszych obliczeń i zapisane [44].

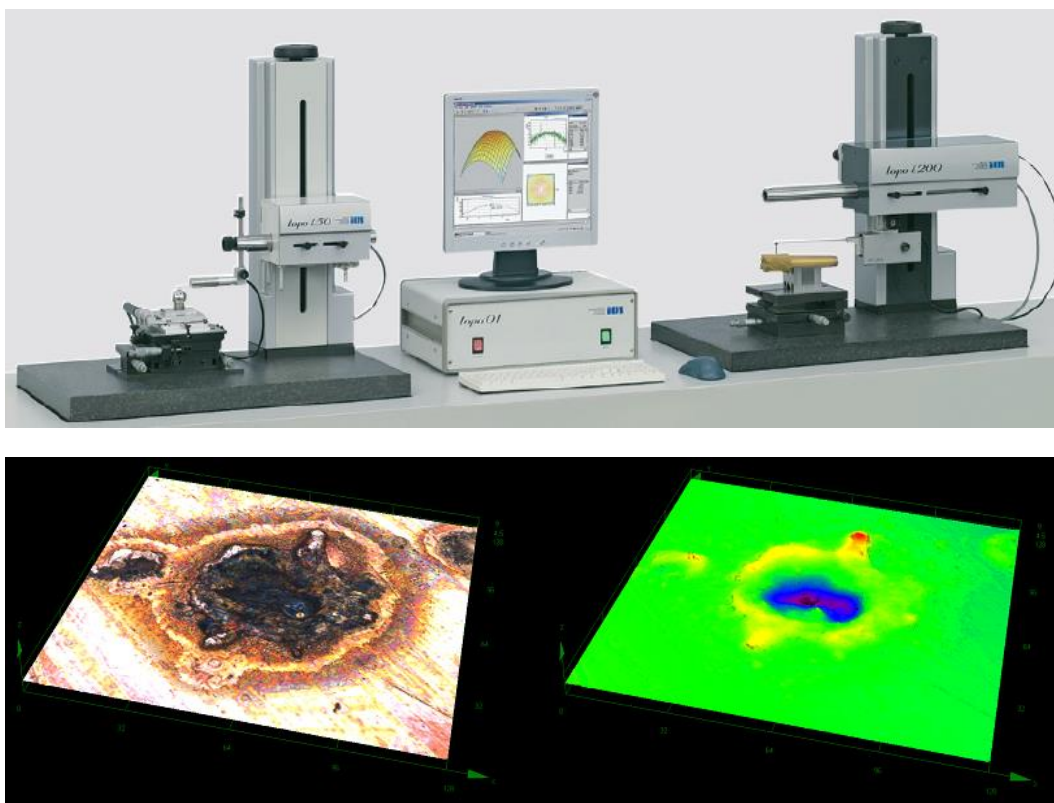
Do analizy struktury geometrycznej powierzchni zastosowano modułowy system TOPO-01, który przeznaczony jest do:

- pomiarów i analizy profili chropowatości i falistości powierzchni oraz profilu pierwotnego,
- pomiarów zarysu kształtu i jego wymiarowanie,
- pomiarów i analizy przestrzennej 2D oraz 3D chropowatości, falistości i kształtu.

Program analizy profilu 2D wykorzystany podczas badań powierzchni elektrod, umożliwia m.in. sporządzenie statystyki parametrów: XQ, s, R_s, MIN, MAX oraz wymiarowanie zarysów profilu. Analiza przeprowadzana jest dla następujących rodzajów profilu:

- profil R - profil chropowatości powierzchni,
- profil W - profil falistości powierzchni.

Na rysunku 4.11 przedstawiono stanowisko badawcze umożliwiające ocenę stanu powierzchni elektrod oraz przykładową uzyskaną w wyniku analizy trójwymiarową mapę powierzchni elektrody.



Rys. 4.11. Stanowisko badawcze – modułowy system TOPO-01 [43]

4.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ BADANYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Przed wykonaniem badań, układ elektroizolacyjny poddaje się procesowi kondycjonowania [83] celem usunięcia 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 mikrowystępy, warstewki związków nieorganicznych (np. tlenków) lub organicznych itp. Proces kondycjonowania polega na wzroście napięcia przeskoku podczas serii pomiarów wytrzymałości elektrycznej. 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 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 proce ten powtarzano. Jako wartość wytrzymałości elektrycznej układu przyjmowano wartość napięcia po stabilizacji jego wartości.

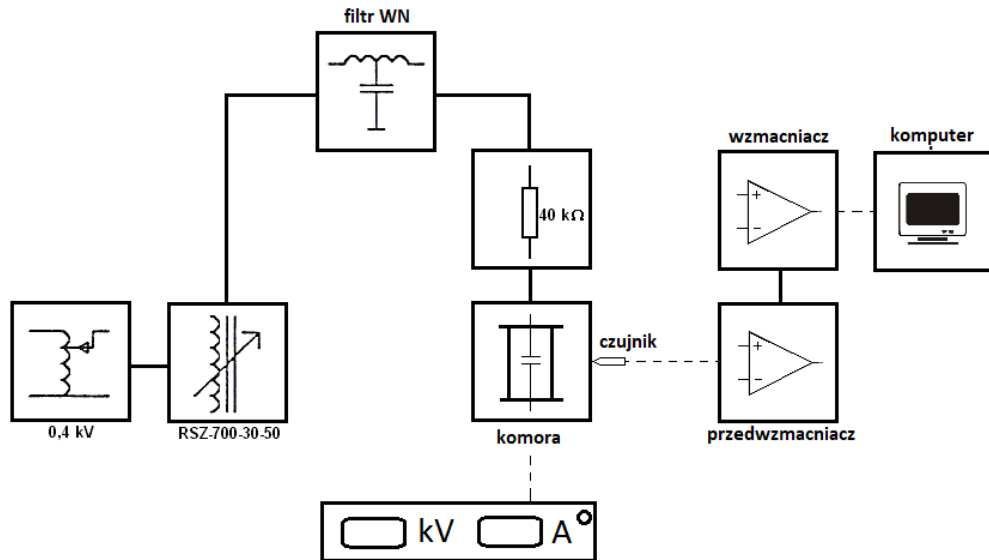
W przypadku układu izolacyjnego z elektrodami pokrytymi cienkimi powłokami dielektrycznymi, przed pomiarem wytrzymałości elektrycznej, celem stabilizacji jej wartości, badany układ izolacyjny kondycjonowano bezprzeskokowo (wyładowaniami niezupełnymi), gdyż przeskoki niszczyłyby powłoki na elektrodach. Podczas tego kondycjonowania badany układ poddawano długotrwałemu działaniu napięcia, którego wartość wolno podwyższano z prędkością około 0,5 kV/min, przy tym z chwilą stwierdzenia występowania mikrowyładowań, których amplituda składowej czynnej prądu poprzedzającego przeskok, przekraczających wartość 0,1 mA, podnoszenie napięcia wstrzymywano na kilka minut, do czasu zaniku mikrowyładowań lub stabilizacji wartości ich amplitudy.

Jako wartość reprezentatywną wytrzymałości elektrycznej badanego układu przyjmowano średnią arytmetyczną z wartości pomierzonych w pięciu niezależnych pomiarach, przeprowadzonych w tych samych warunkach eksperymentalnych, a jako miarę rozproszenia wyników pomiarów wokół średniej – odchylenie standardowe.

4.4. ANALIZA SYGNAŁÓW AKUSTYCZNYCH TOWARZYSZĄCYCH WNZ W UKŁADACH Z I BEZ DODATKOWYCH POWŁOK DIELEKTRYCZNYCH

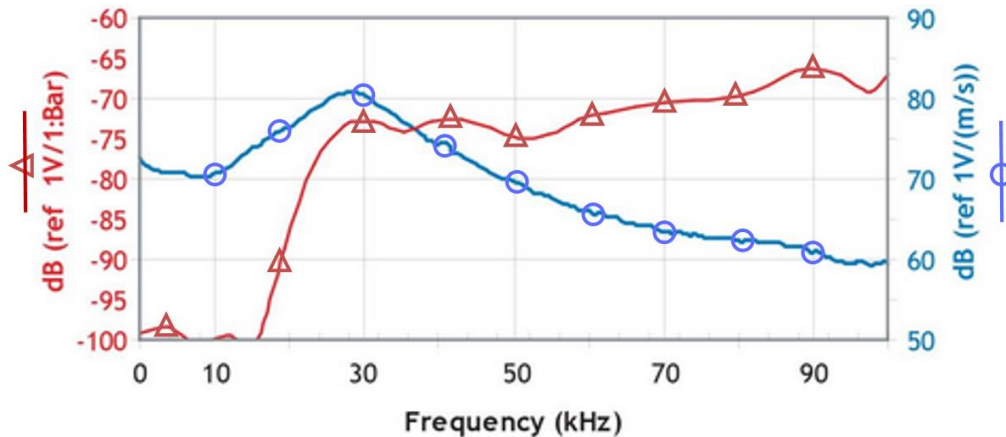
Układ pomiarowy

Badania eksperymentalne przeprowadzono na zbudowanym w tym celu stanowisku pomiarowym, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 4.12. Taka konfiguracja umożliwiła pomiar i rejestrację sygnałów EA oraz wytrzymałości elektrycznej badanego układu izolacyjnego.



Rys. 4.12. Schemat blokowy stanowiska badawczego umożliwiającego pomiar i rejestrację sygnałów EA oraz wytrzymałości elektrycznej badanego układu izolacyjnego

Rys. 4.13 przedstawia charakterystyki częstotliwościowe zastosowanego w badaniach piezoelektrycznego elektroakustycznego czujnika szerokopasmowego typu R3a firmy Physical Acoustics. Ze względu na wstępną analizę FFT (rys. 5.13) [21], spodziewano się, że częstotliwości rejestrowanych sygnałów zawierać się będą w zakresie od 0 do 100 kHz. Przed dokonaniem analizy, charakterystyka częstotliwościowa czujnika została znormalizowana.



Rys. 4.13. Charakterystyka czujnika R3a [20]

Sygnały EA były przesyłane do przedwzmacniacza (o wzmacnieniu równym 20 dB) zintegrowanego z filtrem o paśmie przenoszenia od 20 do 1000 kHz. Po przefiltrowaniu, sygnały przesyłane były do wzmacniacza i rejestrowane na komputerze PC za pomocą karty pomiarowej o częstotliwości próbkowania 1 MHz i rozdzielczości 16 bitów.

Przed wykonaniem pomiarów, układ kalibrowano zgodnie ze standardową procedurą przyjętą do badań metodą EA, tj. Metodą Hsu-Nielsen [36, 121].

Każdy test wykonywany był do momentu wystąpienia przeskoku w układzie. Dla każdej konfiguracji (odległość – ciśnienie) wykonano po pięć testów dla kombinacji odległości międzyelektrodowej (1, 3 lub 5 mm) oraz ciśnienia wewnątrz komory ($1 \cdot 10^5$, $3 \cdot 10^5$ i $5 \cdot 10^5$ Pa). Liczbę tę uznano za wystarczającą, ponieważ nie zaobserwowano między nimi istotnych różnic.

Analiza otrzymanych wyników pomiarów

Do rejestracji sygnałów opracowano program komputerowy, umożliwiający konfigurację parametrów pracy karty pomiarowej, zapis danych w postaci binarnej, a także zapis parametrów pomiarowych w nagłówku pliku.

Zarejestrowane sygnały analizowano za pomocą funkcji opracowanych w programie MATLAB, które działają według następującego algorytmu:

- usuwanie szumów z sygnałów (za pomocą transformacji falkowej),
- obliczanie wybranych parametrów sygnałów EA [22, 61].

Spośród wielu parametrów sygnałów EA do opisu mierzonych wielkości przyjęto:

- sumę i tempo emisji,
- sumę i wskaźnik zdarzeń,
- czas trwania,
- czas trwania zdarzeń,
- amplitudę sygnałów,
- wartość skuteczną sygnału elektrycznego wychodzącego z przetwornika.

Suma zliczeń EA to suma amplitud sygnału przekraczających arbitralnie przyjęty próg dyskryminacji, liczona w określonym przedziale czasu. Z drugiej strony szybkość zliczania ($EA/\Delta t$) jest sumą zliczeń odniesioną do przyjętego przedziału czasu (t) [108].

Suma zdarzeń akustycznych (N) jest definiowana jako liczba zdarzeń zliczonych w określonym przedziale czasu, których obwiednie (w przeciwieństwie do amplitud jak w przypadku sumy zliczeń) przekraczają arbitralnie przyjęty próg dyskryminacji. Z drugiej strony, tempo zdarzeń ($N/\Delta t$) jest sumą zdarzeń odniesionych do przyjętego przedziału czasu (t) [108].

Przeanalizowano wartość skuteczną A_{RMS} sygnału elektrycznego wychodzącego z przetwornika elektroakustycznego (zwanego w skrócie sygnałem RMS).

Dodatkowo przeprowadzono analizy statystyczne. Obliczonymi parametrami były skośność i kurtoza. Skośność, jako miara asymetrii rozkładu prawdopodobieństwa, jest identyfikowana w następujący sposób:

$$\text{skew} = \frac{\bar{x} - \text{med}(x)}{\sqrt{\sigma}}, \quad (4.3)$$

gdzie: \bar{x} – wartość średnia analizowanej wartości, $\text{med}(x)$ – mediana analizowanej wartości, σ – wariancja analizowanego parametru.

Kurtoza, która jest miarą koncentracji wyników wokół średniej, wynosi:

$$\text{kurt} = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (4.4)$$

gdzie: μ_4 – 4-ty moment centralny analizowanego parametru, σ – wariancja analizowanego parametru.

4.5. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Technika wysokich napięć jest działem elektrotechniki, w którym występuje problem losowości czynników warunkujących wyniki pomiarów, a więc i losowości stosowanych, definiowanych w poszczególnych zagadnieniach wielkości takich jak np. napięcie przebicia czy przeskoku, czas do wyładowania, wartość przepięcia itp.

Wyniki pomiaru napięć przeskoku, przebicia lub napięć początkowych wyładowań niepełnych charakteryzują się znacznym rozrzutem. Powody tych rozrzutów mogą leżeć zarówno w samej fizyce zjawisk jak i błędach wynikających z niedoskonałości procesów technologicznych, np.: odchyłki grubości próbek, lokalne defekty struktury itd. Wiąże się to z koniecznością wykonania takiej liczby pomiarów, która umożliwia zastosowanie do obróbki wyników metod rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Posługując się wspomnianym już aparatem matematycznym można znaleźć zbliżoną do realnej wartość szukanej wielkości oraz określić granice pomiędzy którymi, ze znanym prawdopodobieństwem znajduje się wartość rzeczywista [120].

Pozbawione błędów systematycznych, przez wprowadzenie poprawek, wyniki pomiarów tworzą ciąg wartości obarczonych błędami przypadkowymi, skupiony wokół dokładnej wartości wielkości mierzonej. Przyjmuje się zazwyczaj, że rozkład błędów przypadkowych jest zgodny z tzw. prawem rozkładu normalnego błędów. Dla większości występujących błędów przypadkowych, rozkład normalny jest poprawny jakościowo. Trudnością w doświadczalnym potwierdzeniu występowania rozkładu normalnego jest konieczność zgromadzenia dużej ilości wyników pomiarów, które muszą być przeprowadzone w porównywalnych warunkach. Sprawdzenia, czy wielokrotne pomiary napięcia przeskoku w badanych układach podlegają rozkładowi normalnemu, dokonano stosując test Pearsona χ^2 . Testy te przeprowadzone dla poziomu istotności równej 0,05 wykazały, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności badanych populacji z rozkładem normalnym. Wobec powyższego jako wartość reprezentatywną wielokrotnych pomiarów napięcia przeskoku przyjęto średnia arytmetyczną wartości pomierzonych

$$\bar{U}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{p_i}, \quad (4.5)$$

gdzie n – liczba pomiarów, U_p – wartość napięcia przeskoku w i -tym pomiarze, a jako miarę rozproszenia wyników pomiarów wokół średniej arytmetycznej – odchylenie standardowe

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_{p_i} - \bar{U}_p)^2}. \quad (4.6)$$

Jednym z głównych elementów analizy statystycznej wyników pomiarów jest wykrywanie i eliminacja anomalii w wynikach pomiarów. Zastosowano regułę polegającą na odrzuceniu wartości najmniejszej i największej. Przy pięciu wynikach pomiarów utrata dokładności w wyniku jej stosowania wynosi 14% [119], przy czym ze wzrostem liczby pomiarów strata ta staje się coraz mniejsza.

Sprawdzenia, czy liczba powtórzeń pomiaru n jest wystarczająca, aby błąd był na poziomie ufności α , dokonywano za pomocą testu [123] opartego na rozkładzie t Studenta. W tym celu z tablicy rozkładu t Studenta [52] dla założonego poziomu ufności α oraz liczby stopni swobody $k = n-1$, odczytano wartość wielkości t_{α} , a następnie obliczano wartość wielkości

$$q_{\alpha} = \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}}. \quad (4.7)$$

Obliczoną wartość q_{α} porównano z wcześniej odczytaną wartością tabelaryczną wielkości q_{α} . Jeśli otrzymano $q_{\alpha(\text{obl})} < q_{\alpha(\text{tab})}$, to liczbę pomiarów n uważano za wystarczającą dla przyjętego poziomu ufności, w przeciwnym przypadku liczbę pomiarów powiększano.

W związku z tym, że średnia arytmetyczna wartość pomierzonych napięć stanowi najczęściej szacowany parametr populacji, szczególne znaczenie ma znajomość przedziału ufności dla tego właśnie parametru. Średnia arytmetyczna pomierzonych wartości ma wszelkie pożądane cechy estymatorów: zgodność, nieobciążoność, efektywność, dostateczność. Jej rozkład wykorzystuje się do budowy przedziału ufności dla wartości średniej w populacji.

Przedział ufności dla wartości średnich (uzyskanych z serii pomiarów) z nieznanym odchyleniem standardowym (próba mała $n < 30$) wyrażono nierównością

$$\bar{U}_p - t_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{U}_p + t_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (4.8)$$

gdzie μ - dokładna wartość wielkości mierzonej, t_{α} - wartość odczytana z tablicy rozkładu t Studenta dla założonego poziomu ufności α i liczby stopni swobody $k = n-1$.

Równanie aproksymujące wyniki pomiarów zależności napięcia przeskoku w gazowych układach izolacyjnych od długości przerwy międzyelektrodowej miało postać wielomianu drugiego stopnia

$$U_p = Ap^2 + Bp + C, \quad (4.9)$$

gdzie: U_p – wartość napięcia przeskoku (amplituda), w kV; p – ciśnienie gazu (powietrza lub SF₆) w barach (bar = 10⁵ Pa); A, B, C – współczynniki wyznaczone z pomiarów eksperymentalnych za pomocą programu komputerowego Statistica.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

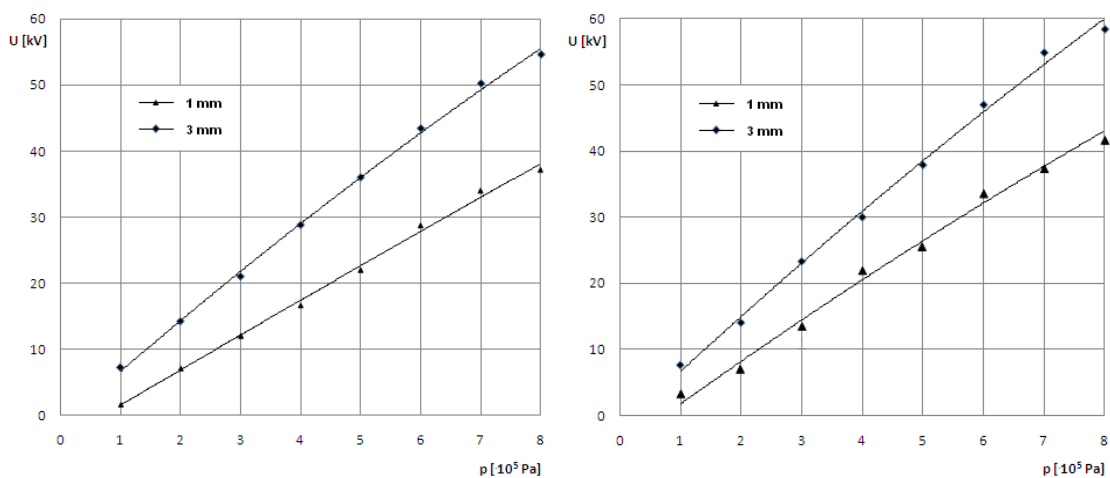
5.1. BADANIA WSTĘPNE

Badania wstępne przeprowadzono zakładając, że przedmiotem tych badań będzie – w pierwszej kolejności – wytrzymałość elektryczna powietrza, a następnie sześćfluorku siarki.

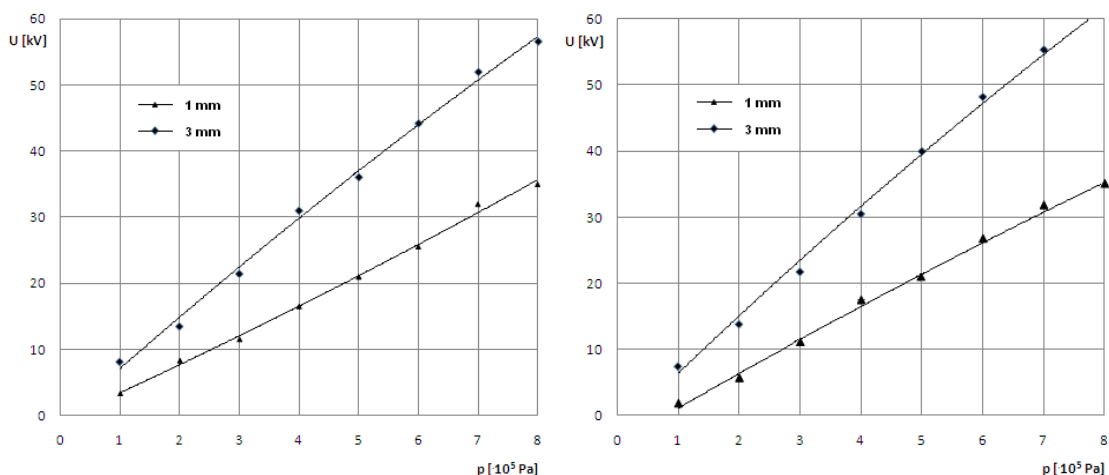
W pierwszym etapie zaplanowano badania wytrzymałości elektrycznej powietrza o ciśnieniu od $1 \cdot 10^5$ Pa do $8 \cdot 10^5$ Pa dla różnych odległości pomiędzy elektrodami (1, 2 lub 3 mm).

Elektrody układu izolacyjnego były wykonane z aluminium, stali nierdzewnej, miedzi lub brązu. Do wyznaczenia parametrów równania opisującego zależności matematyczne wytrzymałości elektrycznej badanych układów od ciśnienia zastosowano program komputerowy Statistica.

Na rys. 5.1 i rys. 5.2 przedstawiono wyznaczone zależności wytrzymałości elektrycznej (wartość skuteczna napięcia przeskoku) układu izolacyjnego z elektrodami wykonanymi z aluminium, stali nierdzewnej, miedzi i brązu, oddalonymi na odległość 1 mm i 3 mm, od ciśnienia powietrza. Zależności te można dostatecznie dokładnie wyrazić matematycznie za pomocą wielomianu drugiego stopnia.



Rys. 5.1. Zależność napięcia przeskoku (napięcie przemienne, wartość skuteczna) w układzie izolacyjnym z elektrodami płaskimi wykonanymi z aluminium (a) lub miedzi (b) od ciśnienia powietrza; odległości elektrod 1 mm i 3 mm (zależności aproksymowano wielomianem drugiego stopnia)



Rys. 5.2. Zależność napięcia przeskoku (napięcie przemiennie, wartość skuteczna) w układzie izolacyjnym z elektrodami płaskimi wykonanymi ze stali (a) lub brązu (b) od ciśnienia powietrza; odległości elektrod 1 mm i 3 mm (zależności aproksymowano wielomianem drugiego stopnia)

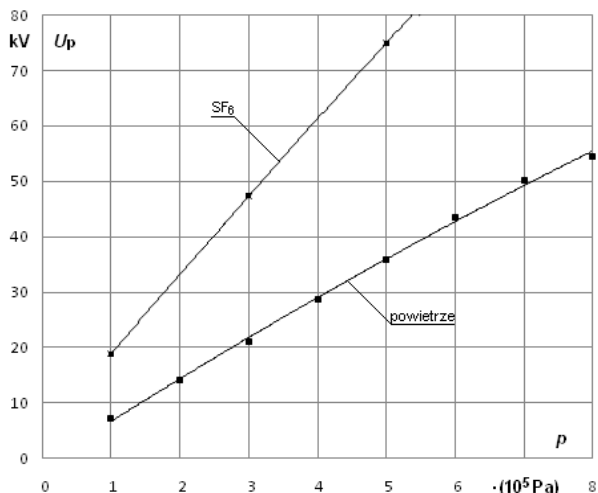
Z rys. 5.2 wynika, że wpływ materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną badanych układów izolacyjnych pojawia się przy natężeniu pola elektrycznego powodującego przeskok wyższym od 15 kV/mm i wzrasta ze wzrostem wartości tego natężenia. Przy tym szereg materiałów elektrodowych ułożony zgodnie z malejącą 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 C, mającej grubość 14...19 μm .

W ramach badań wstępnych przeprowadzono analizę wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego z sześćfluorkiem siarki, którego elektrody wykonane były z aluminium oraz dokonano analizy wpływu warstwy tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych na wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego z SF₆ przy napięciu przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Badania przeprowadzono przy ciśnieniu SF₆ o wartościach 1 · 10⁵ Pa, 3 · 10⁵ Pa i 5 · 10⁵ Pa.

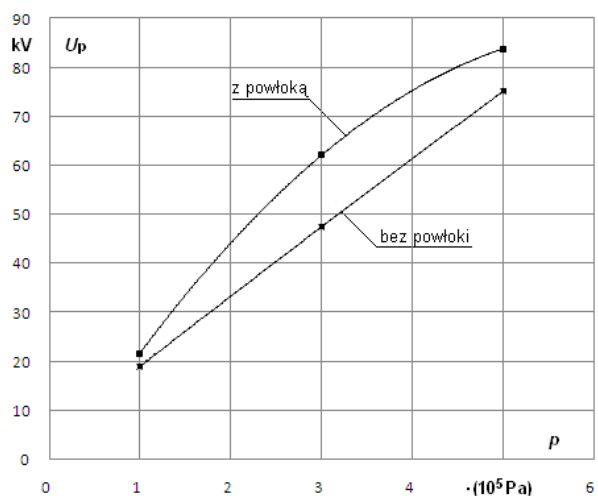
W niniejszych badaniach warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod miała grubość 5...10 μm . Otrzymywano ją w procesie utleniania anodowego powierzchni elektrody aluminiowej w 20% roztworze kwasu siarkowego o temperaturze 20°C; gęstość prądu 400 A/m², czas utleniania 10 min.

Wyniki pomiarów zależności napięcia przeskoku (amplituda) dla układów izolacyjnych z elektrodami aluminiowymi bez powłok tlenkowych na powierzchniach od ciśnienia powietrza i SF₆ przedstawiono na rys. 5.3. Odstęp elektrod wynosił 3 mm. Natomiast wyniki badań wpływ warstwy tlenku aluminium na powierzchniach elektrod

układu izolacyjnego z SF₆ na wytrzymałość elektryczną tego układu przedstawia rys. 5.3. Na rysunku tym zamieszczono wyznaczone zależności napięcia przeskoku (amplituda) od ciśnienia SF₆, dla układów izolacyjnych z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz układów z elektrodami pokrytymi warstwą tlenku aluminium. Odstęp elektrod wynosił 3 mm.



Rys. 5.3. Zależność wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych z elektrodami aluminiowymi od ciśnienia powietrza i SF₆; odstęp elektrod 3 mm



Rys. 5.4. Zależność wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi, od ciśnienia SF₆; odstęp elektrod 3 mm

Z rys. 5.4 wynika, że warstwa tlenku aluminium na powierzchni elektrod powoduje zwiększenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego z SF₆. Przyrost wytrzymałości układu spowodowany obecnością warstwy tlenku aluminium na powierzchniach elektrod był największy w układzie z SF₆ o ciśnieniu 3·10⁵ Pa i wynosił 30%. Mniejsze przyrosty wytrzymałości elektrycznej powodowała warstwa tlenku aluminium na elektrodach przy ciśnieniu SF₆ o wartościach 1·10⁵ Pa i 5·10⁵ Pa. W tym

przypadku przyrosty wytrzymałości elektrycznej spowodowane obecnością warstwy tlenku na powierzchniach elektrod wynosiły odpowiednio 16% i 12%.

Przeprowadzenie badań wstępnych, w których zastosowano elektrody wykonane z różnych materiałów oraz z powłokami dielektrycznymi i bez nich pozwoliło na pierwszą ocenę wpływu tych czynników na wytrzymałość elektryczną powietrza.

Podsumowując można stwierdzić, że warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych zwiększa wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego zarówno ze sprężonym powietrzem jak i ze sprężonym SF₆. Ze względu na to, że największe procentowe zwiększenie napięcia uzyskano dla odległości między elektrodami gazowego układu izolacyjnego wynoszącej 3 mm oraz dla ciśnień w zakresie do 5·10⁵ Pa dalsze badania przeprowadzono dla tej odległości między elektrodami oraz trzech wartości ciśnień powietrza oraz SF₆: 1·10⁵ Pa, 3·10⁵ Pa i 5·10⁵ Pa.

5.2. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ UKŁADÓW IZOLACYJNYCH Z ELEKTRODAMI POKRYTYMI POWŁOKAMI DIELEKTRYCZNYMI

Celem weryfikacji tezy pracy mówiącej o takich powłokach izolacyjnych na powierzchniach elektrod gazowych układów izolacyjnych, które powodują podwyższenie wytrzymałości elektrycznej tych układów i jednocześnie zwiększają odporność powierzchni elektrod na uszkodzenia mechaniczne, przeprowadzono serie badań z wykorzystaniem różnych materiałów na powłoki dielektryczne. W niniejszej pracy przedstawiono rezultaty badań tych powłok izolacyjnych na powierzchniach elektrod gazowego układu izolacyjnego, które spowodowały podwyższenie wytrzymałości dielektrycznej tych układów. Przedmiotem tych badań była wytrzymałość elektryczna powietrza oraz sześćfluorek siarki. Przebadano wytrzymałość elektryczną powietrza oraz SF₆ o ciśnieniu 1·10⁵ Pa, 3·10⁵ Pa i 5·10⁵ Pa dla różnych odległości pomiędzy elektrodami wynoszącej 3 mm. Wybór tych założeń podyktowany został przeprowadzonymi wcześniej badaniami wstępnymi.

Elektrody układu izolacyjnego były wykonane z aluminium. W niniejszych badaniach warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod miała grubość 5...10 μm. Otrzymywano ją w procesie utleniania anodowego powierzchni elektrody aluminiowej w 20% roztworze kwasu siarkowego o temperaturze 20°C; gęstość prądu 400 A/m², czas utleniania 10 min. Jak opisano w rozdziale 4.2, po etapie utleniania anodowego otrzymane powłoki tlenkowe naniesione na elektrody poddano uszczelnianiu (wypełnianiu). Proces ten miał na celu zwiększenie wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej powierzchni elektrod.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem jedenastu różnych lakierów elektroizolacyjnych o różnych parametrach technicznych. W niniejszej pracy

przedstawiono wyniki doświadczeń trzech rodzajów lakierów poliuretanowych oraz dwóch elastycznych powłok silikonowych nanoszonych techniką natryskową.

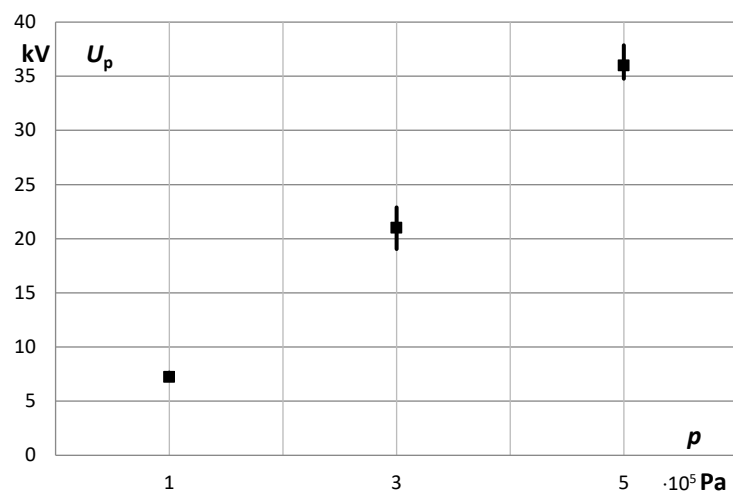
Wybrane materiały są szybkoschnącymi lakierami przeznaczonymi do zabezpieczania elementów elektrycznych, w szczególności tych narażonych na wilgotność oraz przystosowane są do pracy w szerokim zakresie temperatur. Dodatkowo wszystkie te materiały wykazują doskonałą przyczepność do całej gamy różnych materiałów. Wytrzymałość elektryczna zastosowanych lakierów oraz powłok silikonowych wynosiła od 60 do 240 kV/mm. W celu analizy badanych układów izolacyjnych (elektrody bez powłok lub z powłokami tlenkowymi na powierzchni elektrod z naniesionymi cienkimi warstwami elektroizolacyjnymi), przyjęto poniższą identyfikację układów:

- 1) układ izolacyjny elektrod płaskich wykonanych z Al bez powłoki,
- 2) układ izolacyjny elektrod płaskich wykonanych z Al z powłoką Al_2O_3 na ich powierzchni,
- 3) układy izolacyjny elektrod płaskich wykonanych z Al z powłoką Al_2O_3 na powierzchni, każdy z nich pokryty innym materiałem elektroizolacyjnym (trzy typy lakierów poliuretanowych oraz dwa typy elastycznych powłok silikonowych, oznaczonych kolejno symbolami A, B, C, D i E).

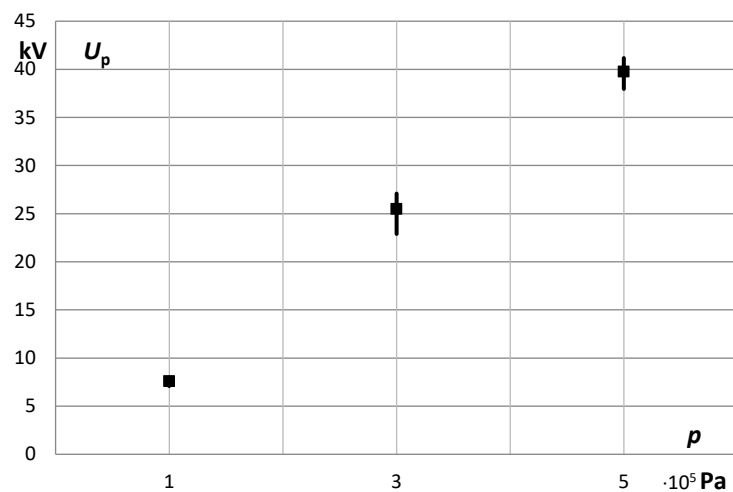
Do wyznaczenia parametrów równania doświadczalnego opisującego zależności matematyczne wytrzymałości elektrycznej badanych układów od ciśnienia zastosowano program komputerowy Statistica.

Na rys. 5.5 przedstawiono zależność wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi (nasyconymi lakierami elektroizolacyjnymi), od ciśnienia powietrza z elektrodami wykonanymi z aluminium, oddalonymi na odległość 3 mm. Badania wytrzymałości elektrycznej układów ze sprężonym powietrzem przeprowadzono przy wartościach ciśnienia $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa.

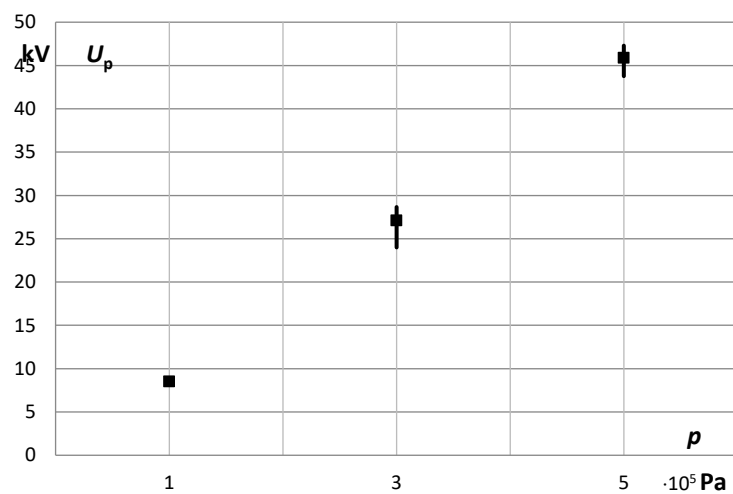
a)



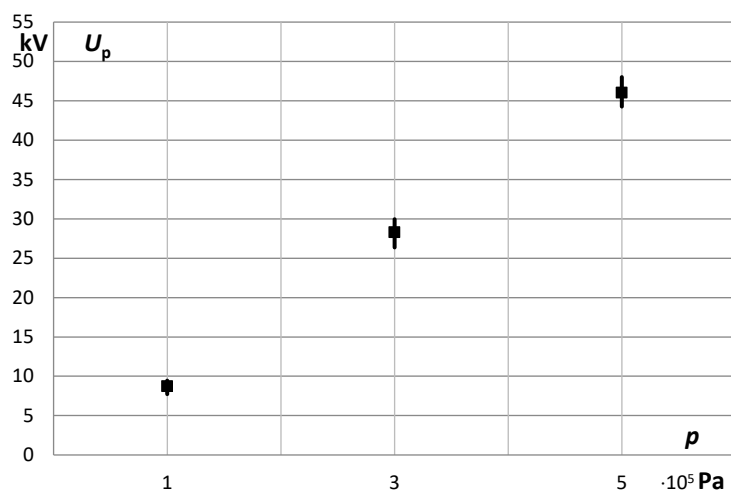
b)



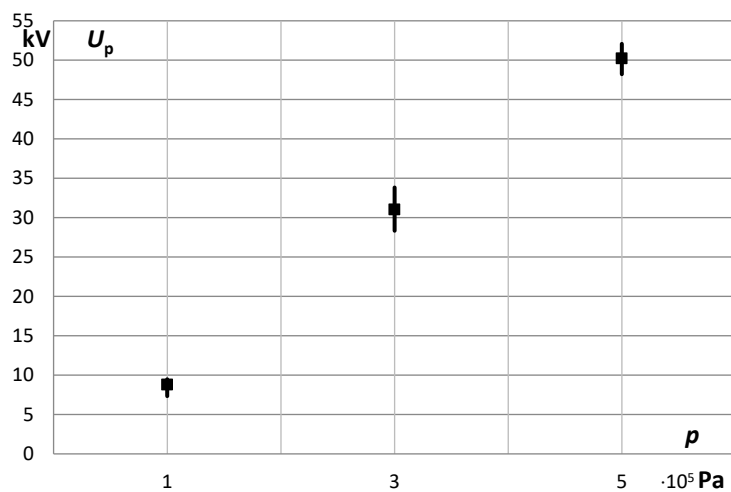
c)



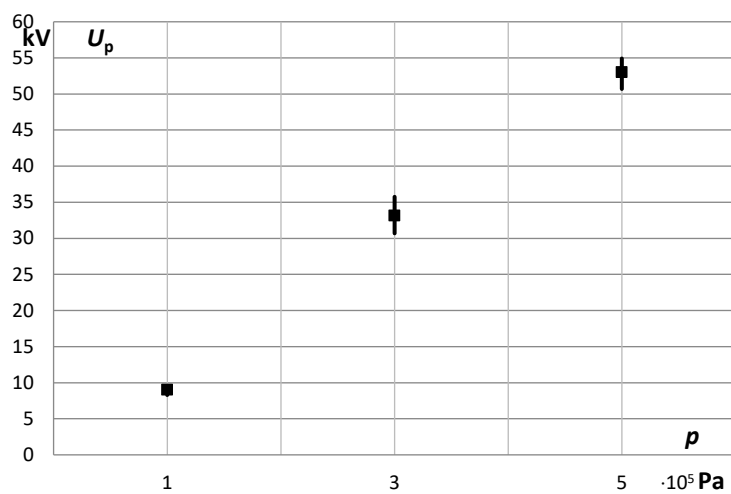
d)



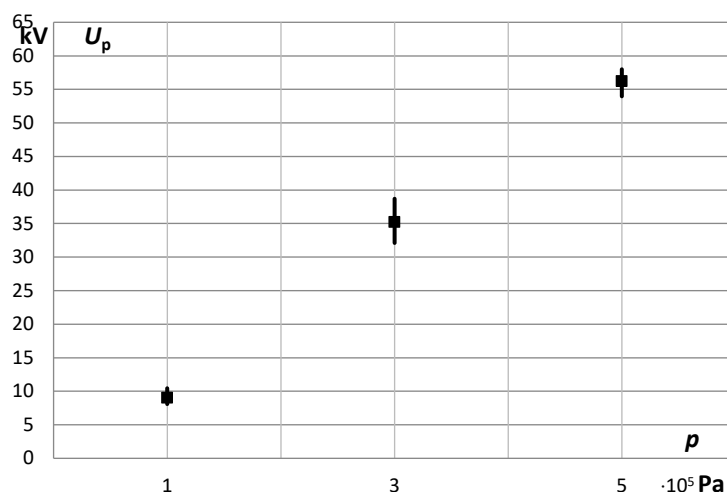
e)



f)



g)

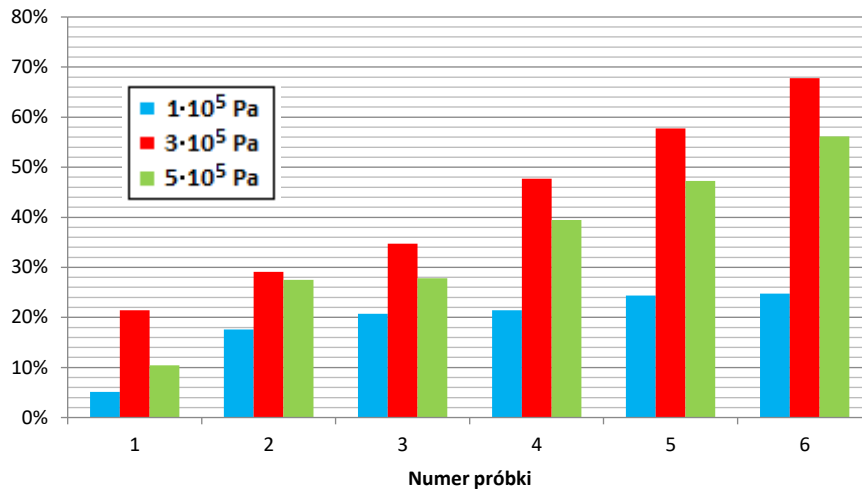


Rys. 5.5. Zależność wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych z elektrodami bez powłok (a) na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi (b, c d, e, f, g), od ciśnienia powietrza; odstęp elektrod 3 mm

W badaniach wstępnych potwierdzono, że pokrycie powierzchni elektrod aluminiowych zastosowanymi powłokami tlenkowymi spowodowało wzrost wytrzymałości elektrycznej powietrznego układu izolacyjnego (przekraczający 20%).

Dodatkowe uszczelnianie powłoki tlenkowej Al_2O_3 (rozdział 4.2) spowodowało dalszy przyrost wytrzymałości elektrycznej układu. Najlepsze rezultaty otrzymano przy ciśnieniu $3 \cdot 10^5$ Pa oraz $5 \cdot 10^5$ Pa, kolejno do prawie 70% i 60%. Oba najlepsze wyniki uzyskano stosując układ izolacyjny z powłoką Al_2O_3 uszczelnioną cienką warstwą materiału o symbolu E. Średnio 20% wynosił procentowy przyrost wytrzymałości powietrznego układu izolacyjnego dla ciśnienia powietrza o wartości 10^5 Pa dla wszystkich zastosowanych materiałów uszczelniających powłoki tlenkowe.

Na rysunku 5.6 przedstawiono procentowy przyrost napięcia przeskoku w powietrzu spowodowany obecnością powłoki tlenkowej na powierzchniach elektrod oraz obecnością powłok służących uszczelnieniu powłok tlenkowych.



Rys. 5.6. Procentowy przyrost napięcia przeskoku w powietrzu spowodowany obecnością powłok na powierzchniach elektrod w stosunku do układu z gołymi elektrodami aluminiowymi

W tabeli 5.1 zestawiono wyniki badań wytrzymałości elektrycznej powietrznego układu izolacyjnego z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi, od ciśnienia powietrza dla odległości między elektrodowej wynoszącej 3 mm.

TABELA 5.1

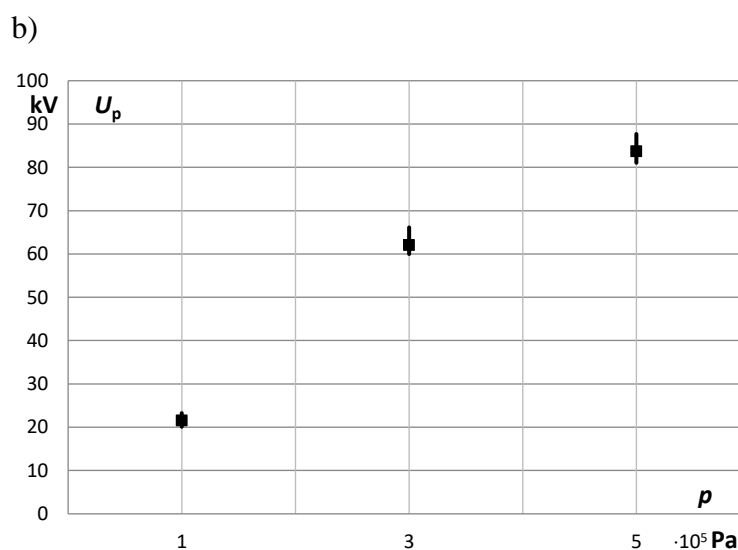
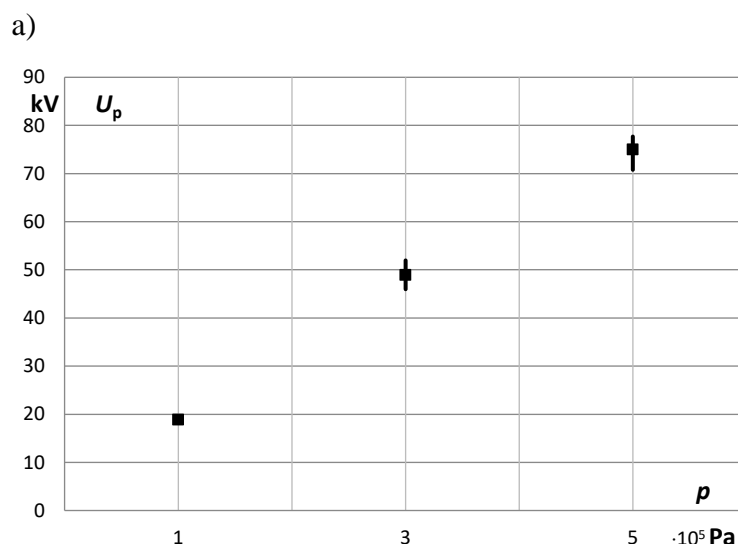
Wyniki badań wytrzymałości elektrycznej (amplituda) powietrznego układu izolacyjnego z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi, od ciśnienia **powietrza**; odległość między elektrodami 3 mm

Badany układ izolacyjny	Wartość ciśnienia [Pa]	Wartość średnia napięcia przeskoku [kV]	Odchylenie standardowe wartości średniej [kV]	Przedział ufności [kV]	
bez powłoki	1·10 ⁵	7,23	0,32	6,79-7,67	
	3·10 ⁵	21,00	1,57	18,82-23,18	
	5·10 ⁵	36,00	1,16	34,39-37,61	
z powłoką Al ₂ O ₃	1·10 ⁵	7,60	0,35	7,11-8,09	
	3·10 ⁵	25,50	1,67	23,18-27,82	
	5·10 ⁵	39,75	1,39	37,82-41,68	
z powłoką Al ₂ O ₃ uszczelnioną cienką warstwą materiału o symbolu	A	1·10 ⁵	8,50	0,31	8,07-8,93
		3·10 ⁵	27,11	1,85	24,54-29,68
		5·10 ⁵	45,89	1,37	43,98-47,80
	B	1·10 ⁵	8,73	0,64	7,84-9,62
		3·10 ⁵	28,29	1,54	26,14-30,44
		5·10 ⁵	46,01	1,64	43,73-48,29
	C	1·10 ⁵	8,78	0,85	7,60-9,96
		3·10 ⁵	30,00	1,18	28,36-31,64
		5·10 ⁵	49,78	2,21	46,71-52,85
	D	1·10 ⁵	8,99	0,46	8,35-9,63
		3·10 ⁵	30,78	2,48	27,34-34,22
		5·10 ⁵	49,99	1,21	48,30-51,68

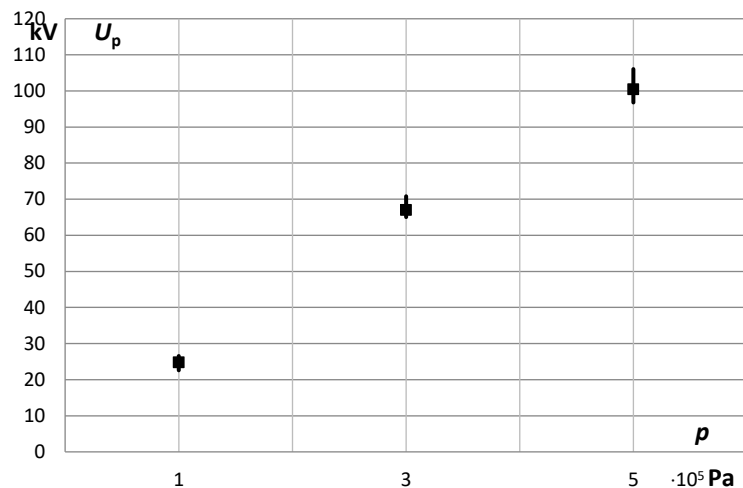
E	$1 \cdot 10^5$	9,02	0,94	7,71-10,33
	$3 \cdot 10^5$	31,01	1,66	28,70-33,32
	$5 \cdot 10^5$	51,32	1,55	49,17-53,47

W przypadku badania układów z SF₆, komorę najpierw opróżniano próżniową pompą obrotową, do ciśnienia 0,1 Pa, po czym włączano do niej SF₆ z butli, poprzez kolumnę z silikażelem. Badania wytrzymałości elektrycznej układów ze sprężonym SF₆ przeprowadzono przy wartościach ciśnienia 10⁵ Pa, 3·10⁵ Pa i 5·10⁵ Pa.

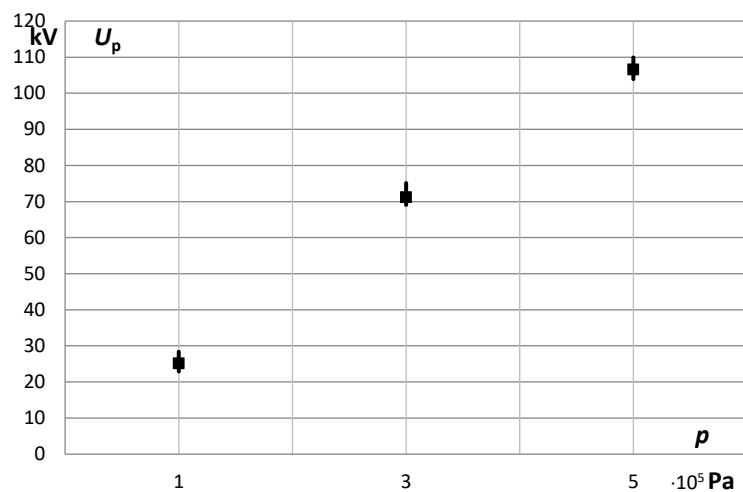
Na rys. 5.7 przedstawiono zależność wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi (nasyconymi lakierami elektroizolacyjnymi), od ciśnienia SF₆, z elektrodami wykonanymi z aluminium, oddalonymi na odległość 3 mm.



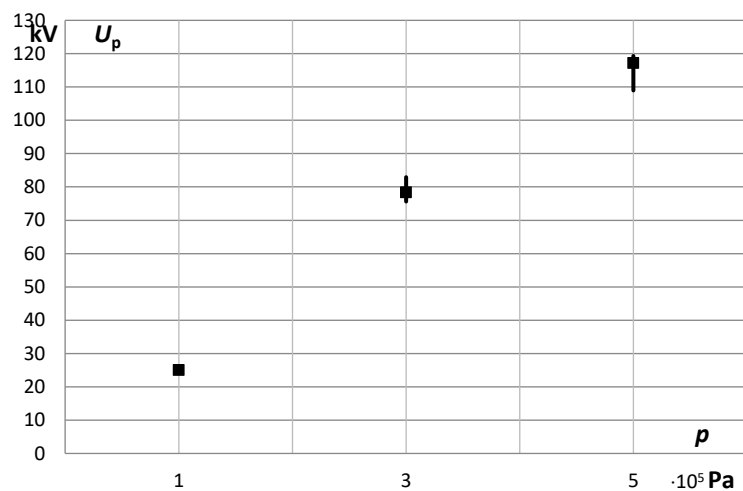
c)

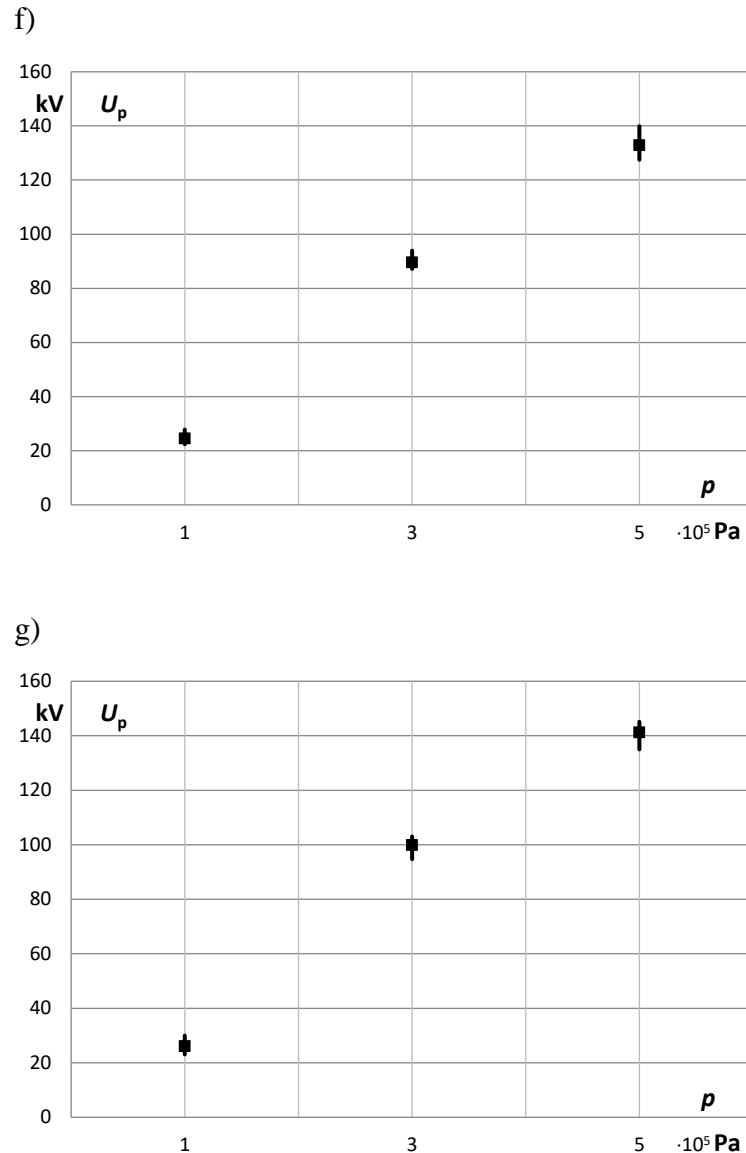


d)



e)

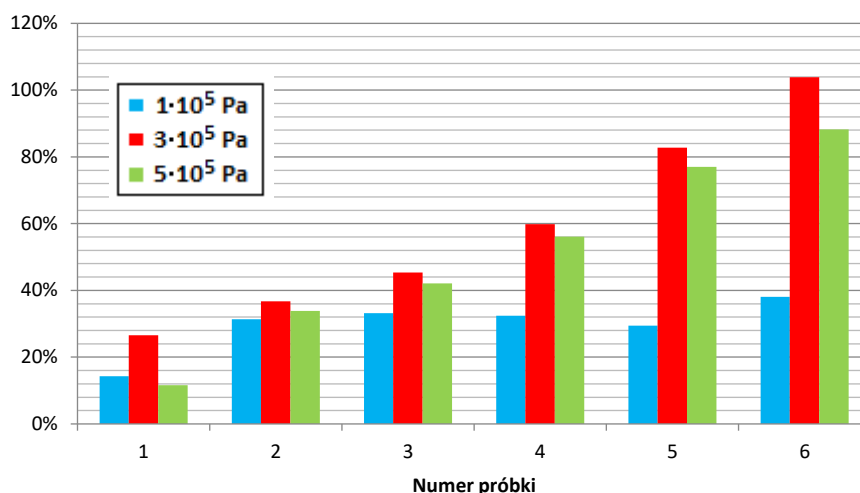




Rys. 5.7. Zależność wytrzymałości elektrycznej, przy napięciu przemiennym (amplituda), układów izolacyjnych z elektrodami bez powłok (a) na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi (b, c, d, e, f, g), od ciśnienia SF_6 ; odstęp elektrod 3 mm

Z rys. 5.7 wynika, że warstwa tlenku aluminium na powierzchni elektrod powoduje zwiększenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego z SF_6 . Przyrost wytrzymałości układu spowodowany obecnością warstwy tlenku aluminium na powierzchniach elektrod oraz jej dodatkowym nasyceniem za pomocą lakierów elektroizolacyjnych był największy w układzie z SF_6 o ciśnieniu $3 \cdot 10^5$ Pa i wyniósł 104% (dla układu izolacyjnego z powłoką Al_2O_3 uszczelnionego cienką warstwą materiału o symbolu E). Nieco mniejsze przyrosty wytrzymałości elektrycznej powodowała warstwa tlenku aluminium na elektrodach przy ciśnieniu SF_6 o wartościach $1 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa. W tym przypadku przyrosty wytrzymałości elektrycznej spowodowane obecnością warstwy tlenku na powierzchniach elektrod (i uszczelnieniem warstwy Al_2O_3) wynosiły odpowiednio do 38% i 88%.

Na rysunku 5.8 przedstawiono procentowy przyrost napięcia przeskoku w SF₆ spowodowany obecnością powłoki tlenkowej na powierzchniach elektrod oraz obecnością powłok służących uszczelnieniu powłok tlenkowych.



Rys. 5.8. Procentowy przyrost napięcia przeskoku w SF₆ spowodowany obecnością powłok na powierzchniach elektrod w stosunku do układu z gołymi elektrodami aluminiowymi

W tabeli 5.2 zestawiono wyniki badań wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego wypełnionego SF₆ z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi, od ciśnienia powietrza dla odległości między elektrodowej wynoszącej 3 mm.

TABELA 5.2

Wyniki badań wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego z SF₆ z elektrodami bez powłok na powierzchniach oraz z powłokami tlenkowymi, od ciśnienia SF₆; odległość między elektrodami 3 mm

Badany układ izolacyjny	Wartość ciśnienia [Pa]	Wartość średnia napięcia przeskoku [kV]	Odchylenie standardowe wartości średniej [kV]	Przedział ufności [kV]	
bez powłoki	1·10 ⁵	18,89	0,30	18,47-19,31	
	3·10 ⁵	49,00	2,36	45,72-52,28	
	5·10 ⁵	75,03	2,72	71,25-78,81	
z powłoką Al ₂ O ₃	1·10 ⁵	21,58	1,45	19,56-23,60	
	3·10 ⁵	62,04	2,60	58,43-65,65	
	5·10 ⁵	83,72	2,54	80,18-87,26	
z powłoką Al ₂ O ₃ uszczelnioną cienką warstwą materiału	A	1·10 ⁵	24,81	1,87	22,22-27,40
		3·10 ⁵	67,00	2,24	63,89-70,11
		5·10 ⁵	100,42	3,47	95,59-105,25
	B	1·10 ⁵	25,15	2,06	22,28-28,02
		3·10 ⁵	71,21	2,44	67,82-74,60
		5·10 ⁵	106,60	2,16	103,60-109,60
	C	1·10 ⁵	25,02	0,67	24,10-25,94
		3·10 ⁵	76,45	4,72	69,88-83,02
		5·10 ⁵	117,12	4,54	110,81-123,43

	D	$1 \cdot 10^5$	24,45	2,20	21,39-27,51
		$3 \cdot 10^5$	80,34	2,54	76,81-83,87
		$5 \cdot 10^5$	121,80	3,84	116,46-127,14
	E	$1 \cdot 10^5$	26,09	3,05	21,84-30,34
		$3 \cdot 10^5$	81,89	5,33	74,48-89,30
		$5 \cdot 10^5$	122,23	4,13	116,49-127,97

Analizując wyznaczone eksperymentalnie wyniki badań wytrzymałości elektrycznej powietrznego układu izolacyjnego z elektrodami bez powłok na powierzchniach, z powłokami tlenkowymi oraz z uszczelnionymi powłokami tlenkowymi od ciśnienia powietrza i SF₆ można zauważyć, że przyrost wytrzymałości elektrycznej nie jest funkcją liniową.

Najmniejszy rozrzut wyników uzyskano dla ciśnienia $1 \cdot 10^5$ Pa (zarówno dla powietrza jak i SF₆ zastosowanych jako medium izolujące). Największy rozrzut wyników pomiarów zauważono dla badań przy ciśnieniu $3 \cdot 10^5$ Pa.

5.3. ANALIZA ZMIAN STANU POWIERZCHNI ELEKTROD WSKUTEK WYSTĘPOWANIA PRZESKOKÓW

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania wpływu materiału elektrod oraz powłok dielektrycznych na ich powierzchniach na wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych. Badaniom poddano elektrody wykonane z aluminium, mosiądzu, oraz stali nierdzewnej.

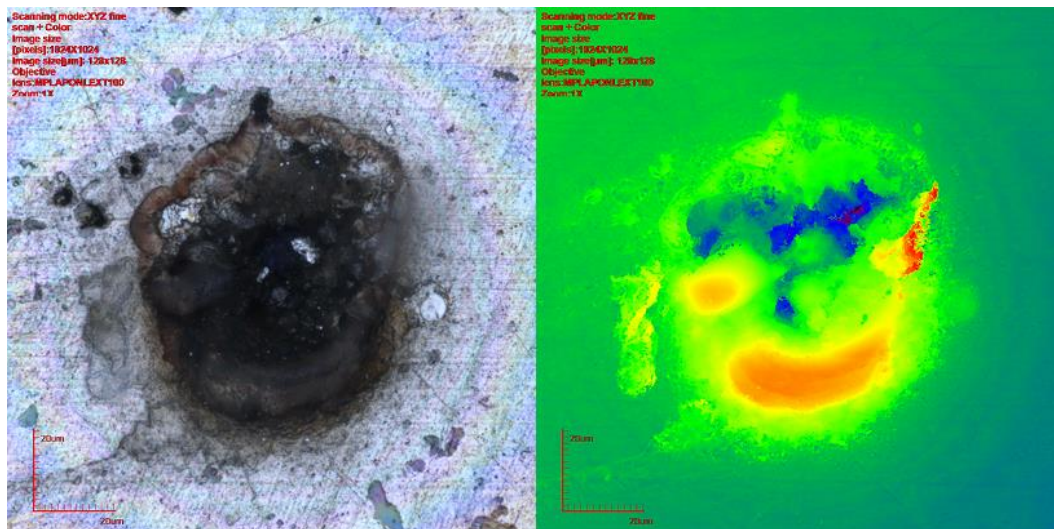
Po dokonaniu pomiarów napięcia przeskoku w poszczególnych konfiguracjach elektrod przeprowadzono ocenę stanu powierzchni elektrod za pomocą mikroskopu LEXT firmy Olympus. Opis stanowiska pomiarowego przedstawiono w rozdziale 4.2.

W celu oceny wpływu materiału elektrod oraz powłok dielektrycznych na ich powierzchniach na wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych, badaniom poddano elektrody wykonane z aluminium (99,95%), stali nierdzewnej (H18N9) i mosiądzu oraz elektrodę aluminiową pokrytą tlenkiem aluminium o grubości 14 μm.

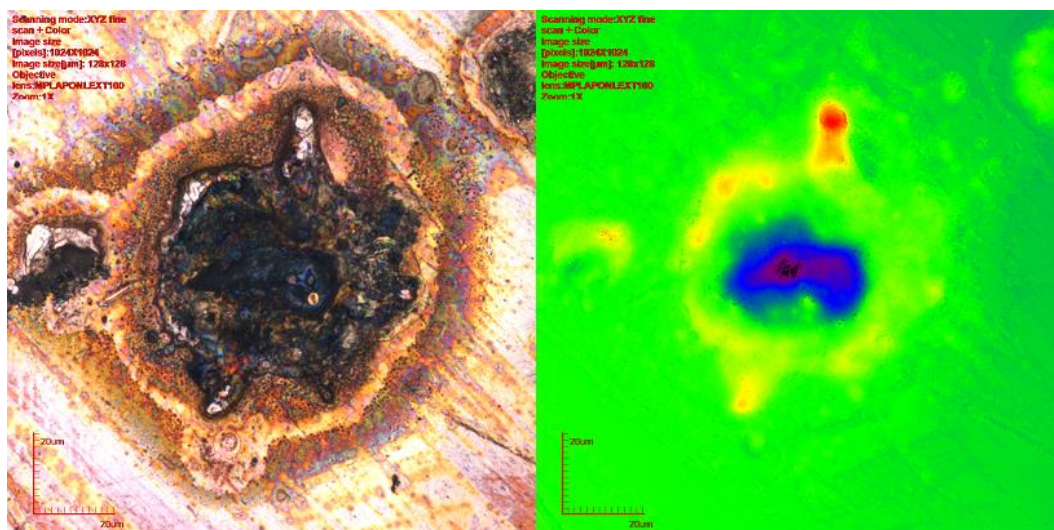
Szczegółowy opis konstrukcji komory gazowej, w której umieszczone były przedmiotowe elektrody oraz parametry technologiczne tychże elektrod przedstawiono w pracy [126]. Proces przygotowania powierzchni elektrod, sposób wytwarzania na nich powłok tlenkowych oraz opis układu pomiarowego zawiera praca [127].

Na rysunku 5.9 i 5.10 przedstawiono kolejno dwuwymiarowe i trójwymiarowe mapy powierzchni badanych elektrod.

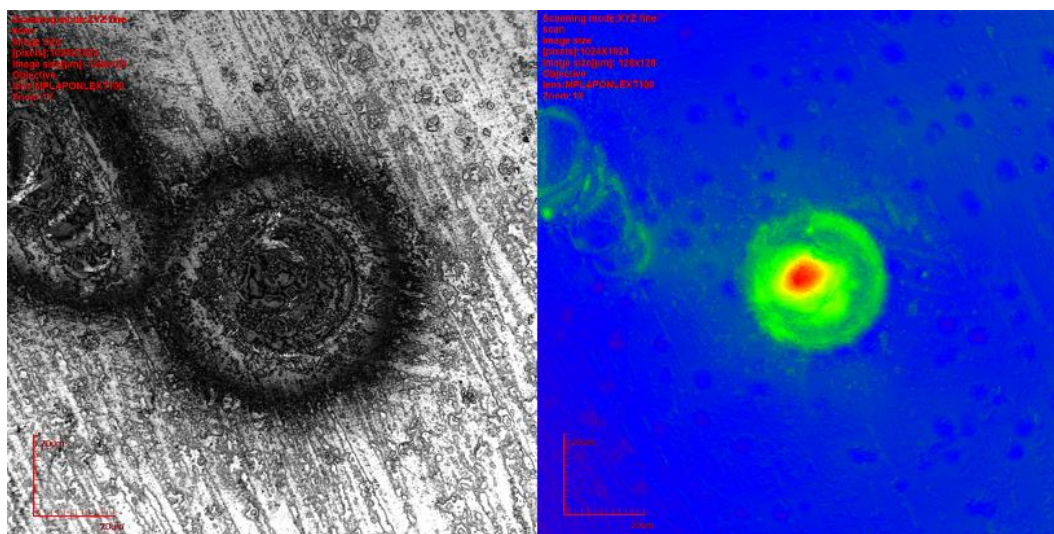
a)



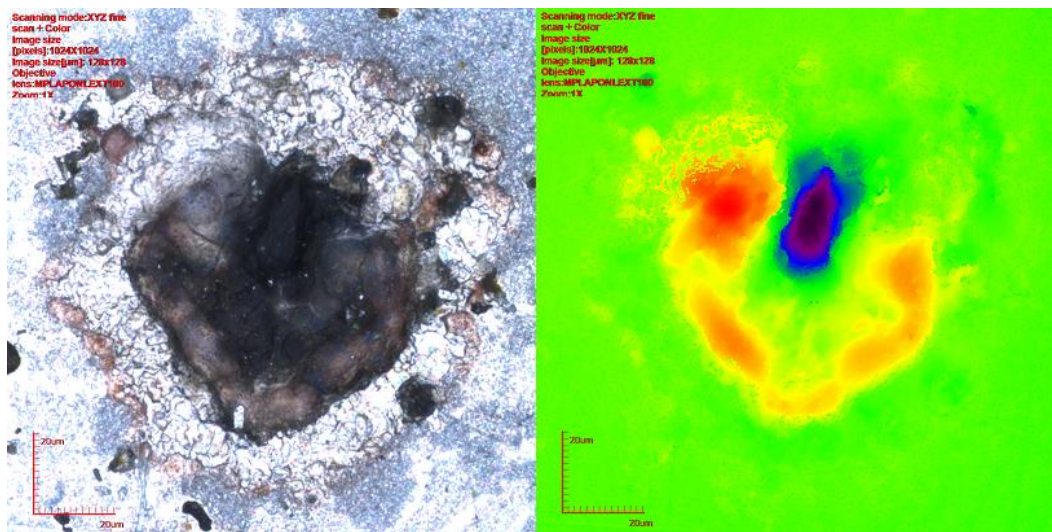
b)



c)



d)

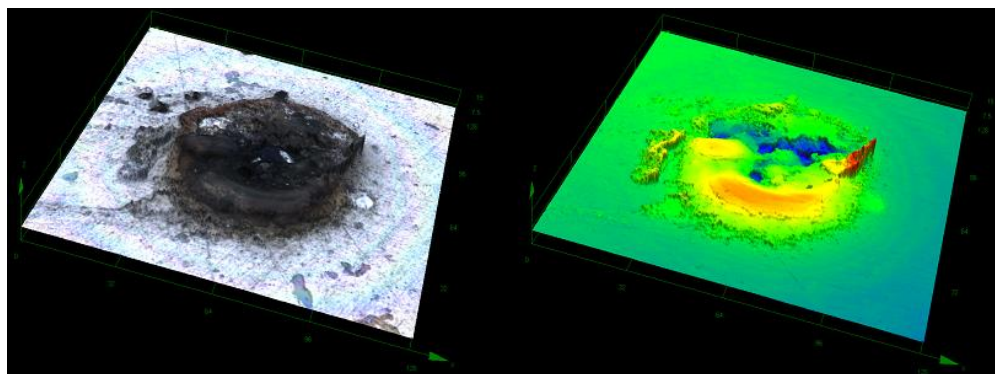


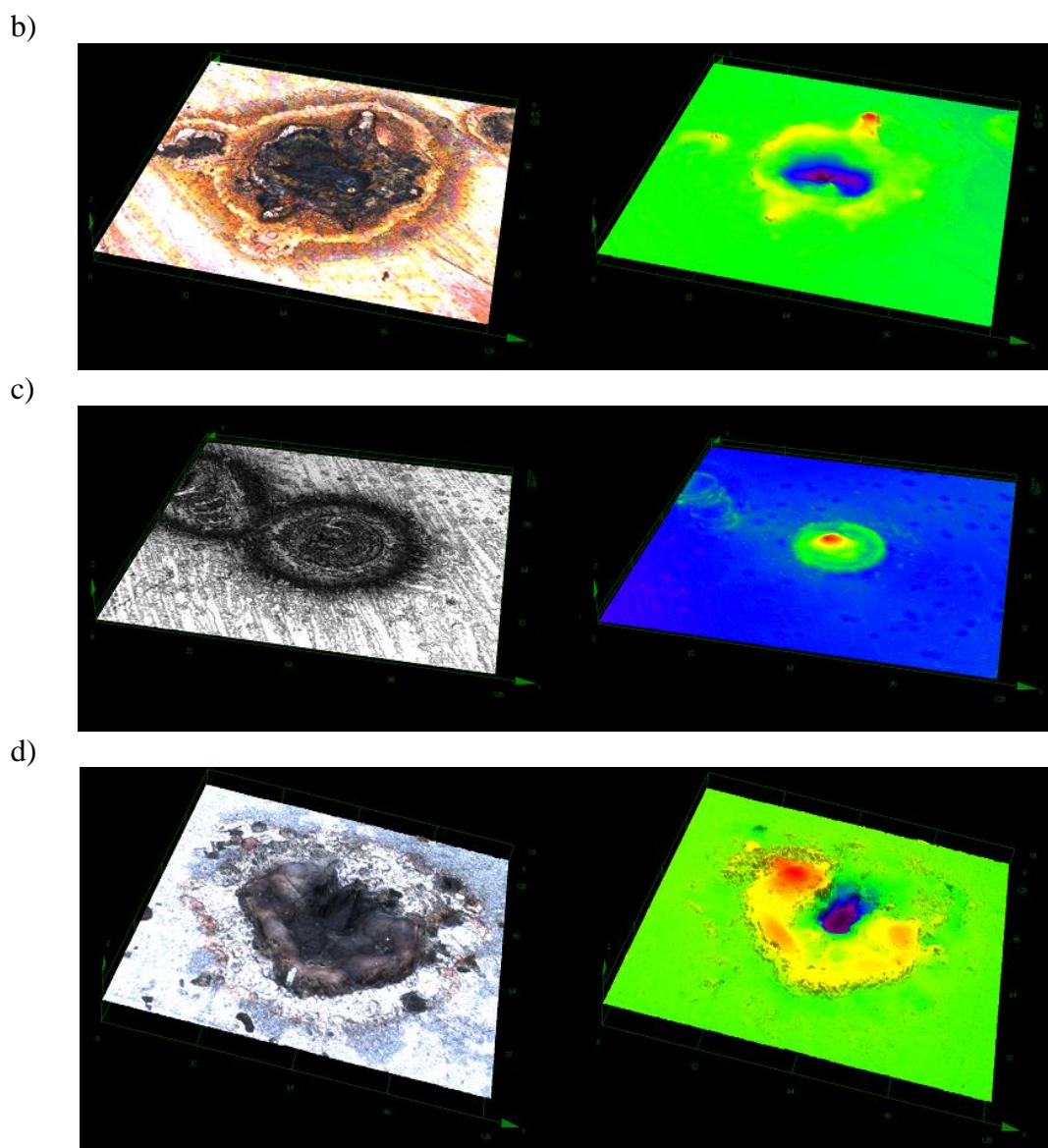
Rys. 5.9. Mapa 2D powierzchni elektrod wykonanych z: a) aluminium, b) miedzi, c) stali nierdzewnej, d) aluminium z warstwą Al_2O_3

Najważniejszymi parametrami obliczonymi w programie w zakresie analizy 3D charakteryzującymi powierzchnię są [86]:

- SRp – wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
- SRv – głębokość najniższego wgłębienia profilu,
- SRz – najwyższa wysokość profilu,
- SRc – średnia wysokość profilu,
- SRa – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,
- SRq – średnia kwadratowa rzędnych profilu,
- SRzjis – najwyższa wysokość profilu.

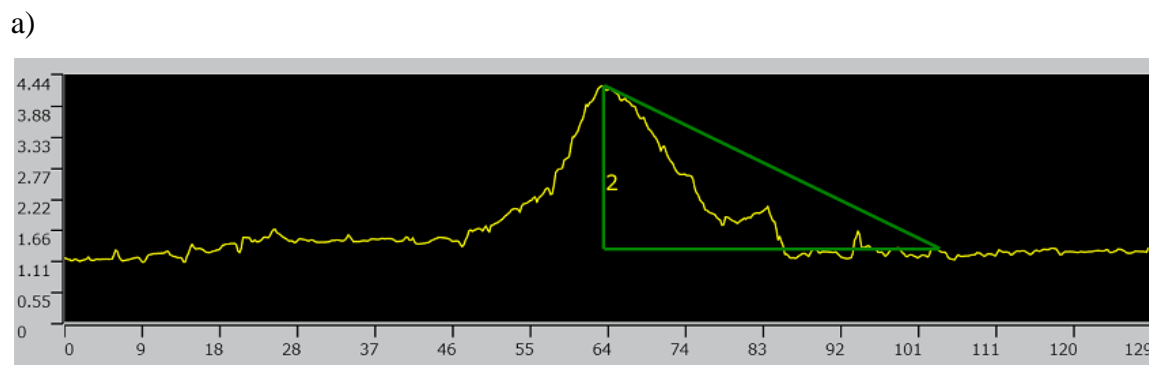
a)



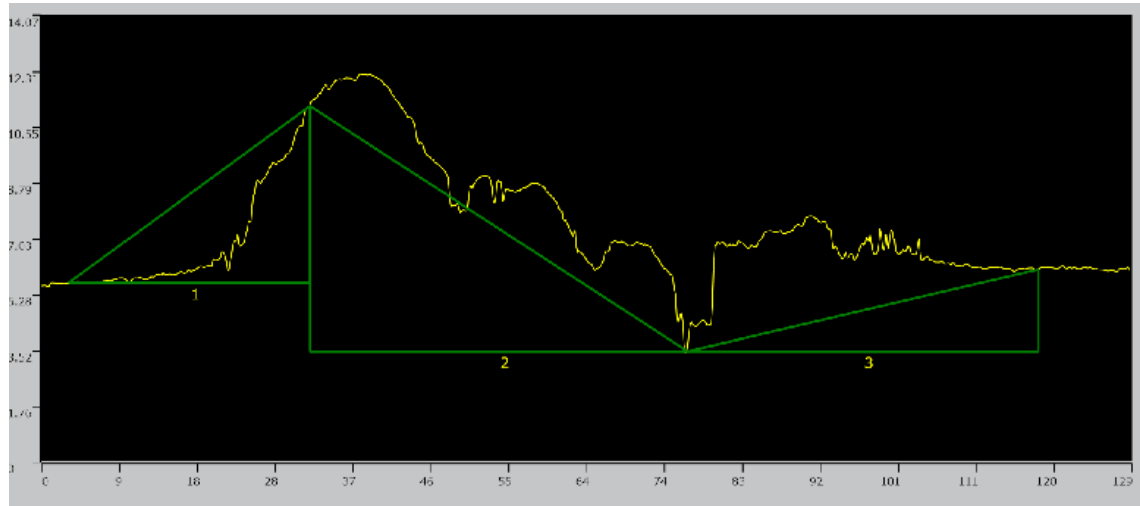


Rys. 5.10. Mapa 3D powierzchni elektrod wykonanych z: a) aluminium, b) miedzi, c) stali nierdzewnej, d) aluminium z warstwą Al_2O_3

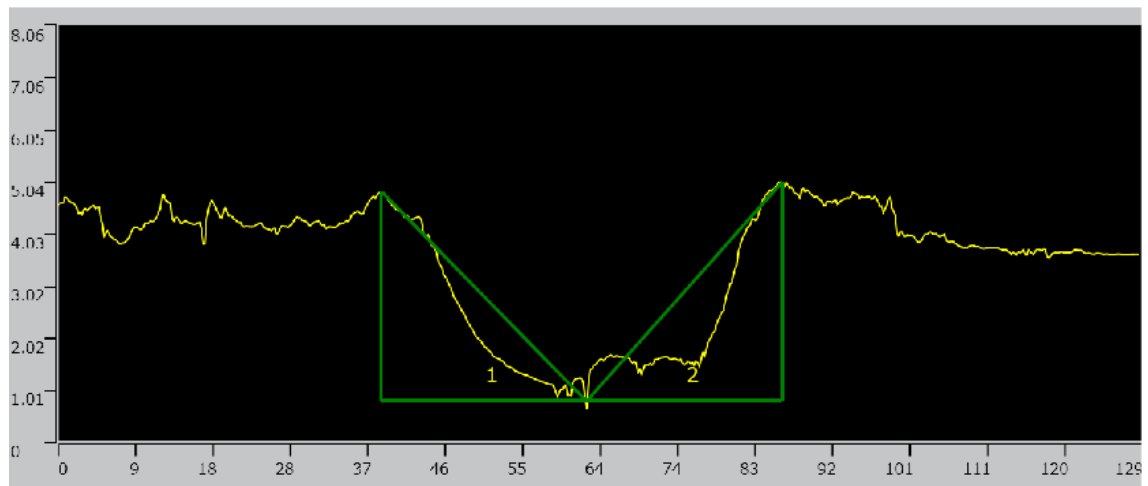
Na rysunku 5.11 przedstawiono profile krateru na powierzchni elektrody powstałego wskutek przeskoku elektrycznego.



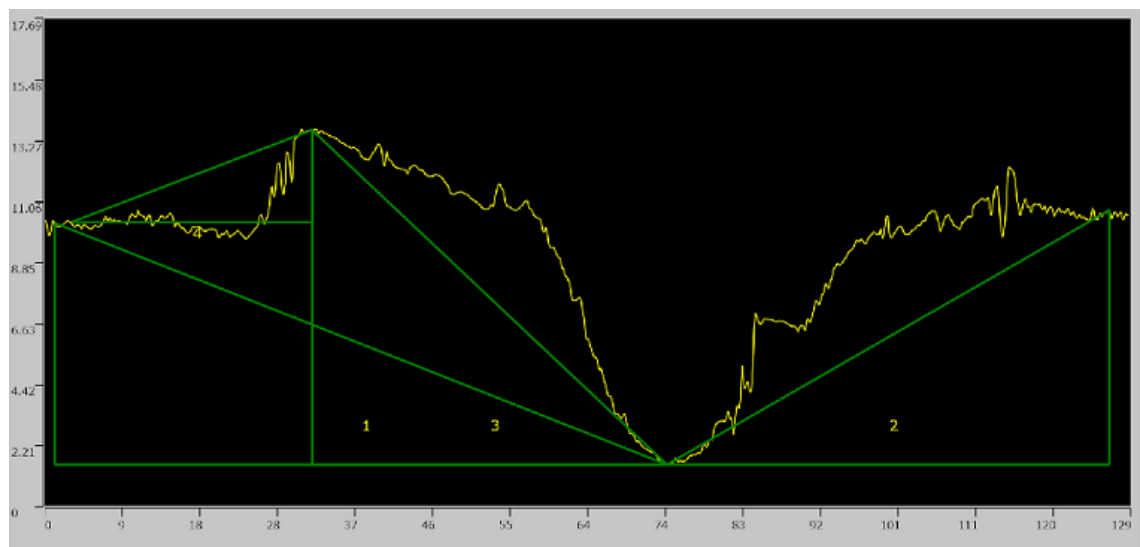
b)



c)



d)



Rys.5.11. Profil krateru na powierzchni elektrody powstałego wskutek przeskoku elektrycznego: a) stal nierdzewna, b) aluminium, c) mosiądz, d) aluminium z warstwą Al_2O_3

Badania powierzchni elektrod (rys. 5.9, 5.10, 5.11) po przepływie prądu wykazywały, że ślady na powierzchniach elektrod były:

- kraterami powstałymi wskutek uderzenia materiałem elektrody przeciwległej,
- kraterami i śladami nadtopień uformowanymi w wyniku wyładowania lokalnego.

Materiał elektrod był przenoszony w postaci mikrocząstek o promieniach od kilku setnych μm do około 2 μm .

Najistotniejszymi parametrami charakteryzującymi powierzchnię elektrod wykonanych z różnych materiałów z punktu widzenia oceny stanu powierzchni w badanym układzie jest wysokość najwyższego wzniesienia profilu (SRp) oraz głębokość najniższego wgłębienia profilu (SRv).

W przypadku elektrod wykonanych z aluminium, mosiądzu i aluminium pokrytym cienką warstwą Al_2O_3 można zaobserwować krater powstałe wskutek uderzenia materiałem elektrody przeciwległej, a wartości głębokości najniższego wgłębienia profilu wynoszą odpowiednio: 5,614, 4,218 i 2,721 μm .

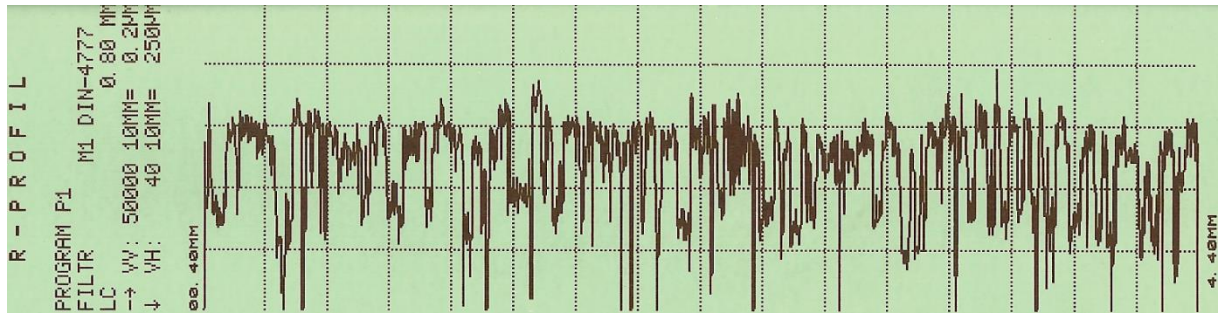
W przypadku elektrody wykonanej ze stali nierdzewnej można wyraźnie zauważyć ślady nadtopień uformowanych w wyniku wyładowania, o wysokości najwyższego wzniesienia profilu wynoszącej 2,940 μm .

Wskutek naniesienia cienkiej warstwy tlenku aluminium na powierzchnię aluminiowej elektrody, krater powstały wskutek uderzenia materiałem elektrody przeciwległej jest mniejszy o około 48% w stosunku do elektrody bez tej powłoki.

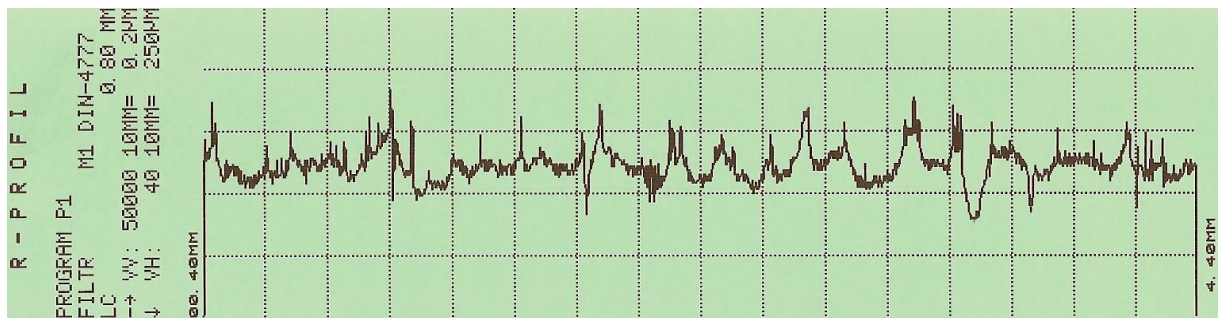
Analizując parametry amplitudowe dla powierzchni badanych elektrod stwierdzono, że warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych zwiększa wytrzymałość elektryczną, ale i przede wszystkim wytrzymałość mechaniczną gazowych układów izolacyjnych. Powstałe krater na powierzchni elektrod z Al_2O_3 są mniejsze o prawie 50% w stosunku do elektrody bez tej powłoki. Przedmiotowa warstwa tlenku aluminium, otrzymywana w procesie utleniania anodowego aluminiowej powierzchni ma wysoką temperaturę topnienia (około 2300 K), dużą adhezję do podłoża i bardzo dużą twardość, porównywalną z twardością kwarcytu. Chroni ona bardzo dobrze powierzchnię aluminium przed uszkodzeniami mechanicznymi (np. przy montażu), które to mogą spowodować obniżenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego. Przeprowadzone pomiary twardości wykazały twardość przedmiotowych powłok tlenkowych Al_2O_3 w zakresie 1820-1896 HV (w skali Vickersa).

Na rysunku 5.12 przedstawiono profile chropowatości powierzchni elektrod na poszczególnych etapach przygotowania: a) po procesie obróbki skrawaniem, b) po procesach polerowania i płukania, c) po procesie naniesienia warstwą tlenku aluminium.

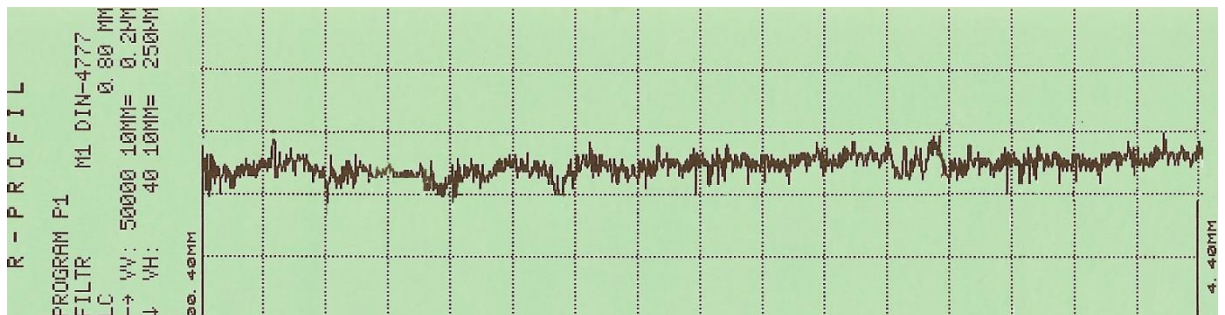
a)



b)



c)

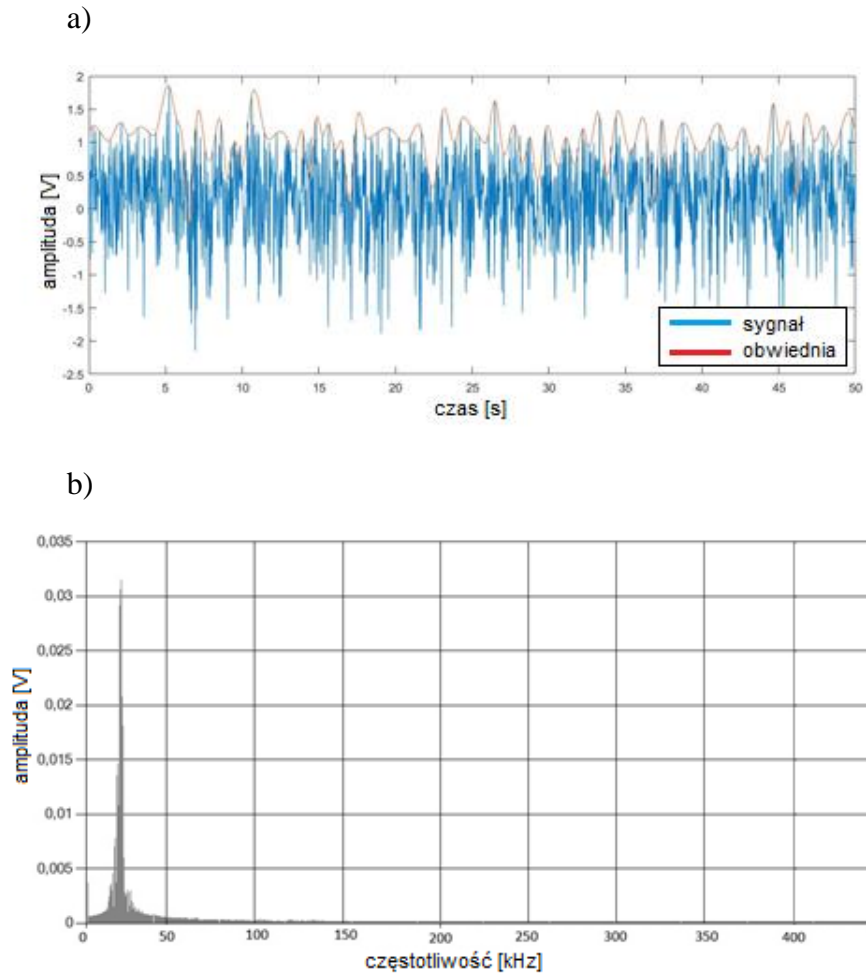


Rys.5.12. Profile chropowatości powierzchni elektrod na poszczególnych etapach przygotowania: a) po procesie obróbki skrawaniem, b) po procesach polerowania i płukania, c) po procesie naniesienia warstwą tlenku aluminium

5.4. BADANIA MECHANIZMU INICJOWANIA PRZESKOKU W UKŁADACH IZOLACYJNYCH Z DIELEKTRYKIEM NA ELEKTRODACH, NA PODSTAWIE ANALIZY WYŁADÓWAŃ NIEZUPEŁNYCH

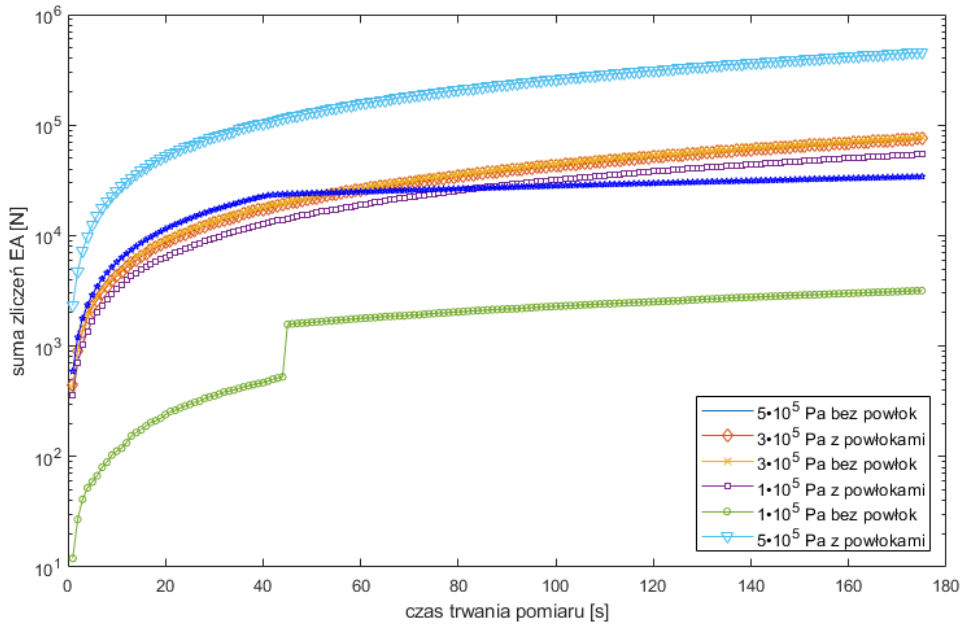
Rys. 5.13 pokazuje przykład zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej (EA) wraz z jego wyznaczoną numerycznie obwiednią. Na przebiegu sygnału EA punkty graniczne pojedynczej emisji (początek i koniec), są stosunkowo trudne do zidentyfikowania, podobnie jak jednoznaczne wskazanie wznoszącego się i opadającego czoła serii emisji (czyli obwiedni), co może stanowić problem w prawidłowej ocenie

parametrów sygnału. Dlatego pomimo znacznego odszumienia sygnałów poziom dyskryminacji sygnałów ustalono na wartość znacznie wyższą niż poziom szumu aparatury. Parametry odszumienia to: falka db5, filtracja twardego progowania metodą Donoho-Johnstona z poziomem progu równym 6 mV – jest to spodziewany poziom szumów generowanych przez aparaturę (zgodnie dokumentacją).



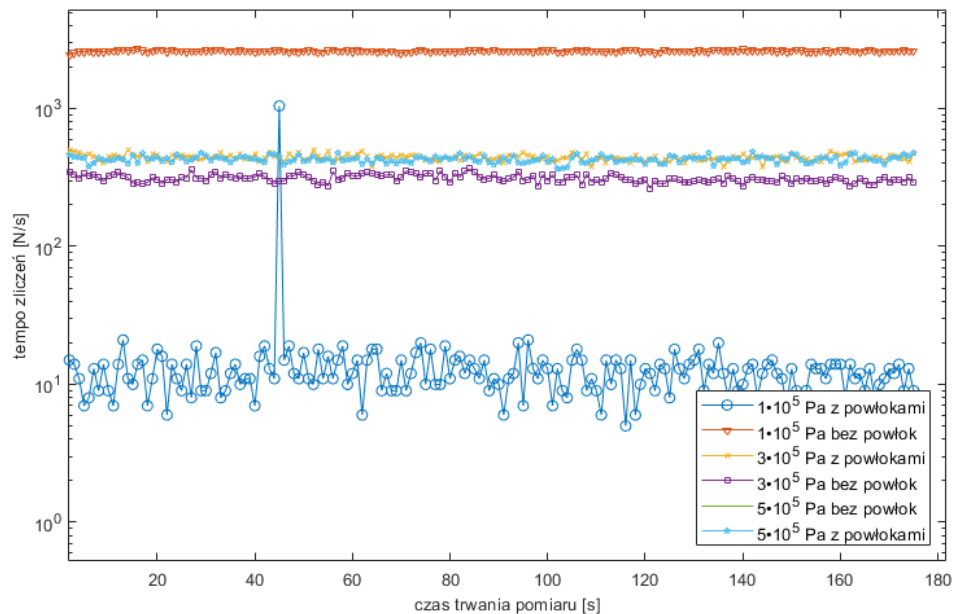
Rys. 5.13. Przykład zarejestrowanego sygnału emisji akustycznej: a) przebieg czasowy sygnału elektrycznego emisji akustycznej wraz z jego obwiednią, b) widmo częstotliwościowe sygnału elektrycznego emisji akustycznej

Rys. 5.14-5.18 przedstawiają odpowiednio parametry sygnału: sumę i tempo zliczeń, sumę i tempo zdarzeń, wartość skuteczną sygnału elektrycznego emisji akustycznej (A_{RMS}) dla przypadku bez i z powłoką. Przedstawione przykłady dotyczą przypadku, w którym odległość między elektrodami wynosiła 3 mm, a ciśnienie powietrza wynosiło $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa.



Rys. 5.14. Suma zliczeń emisji akustycznej (ΣEA) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa

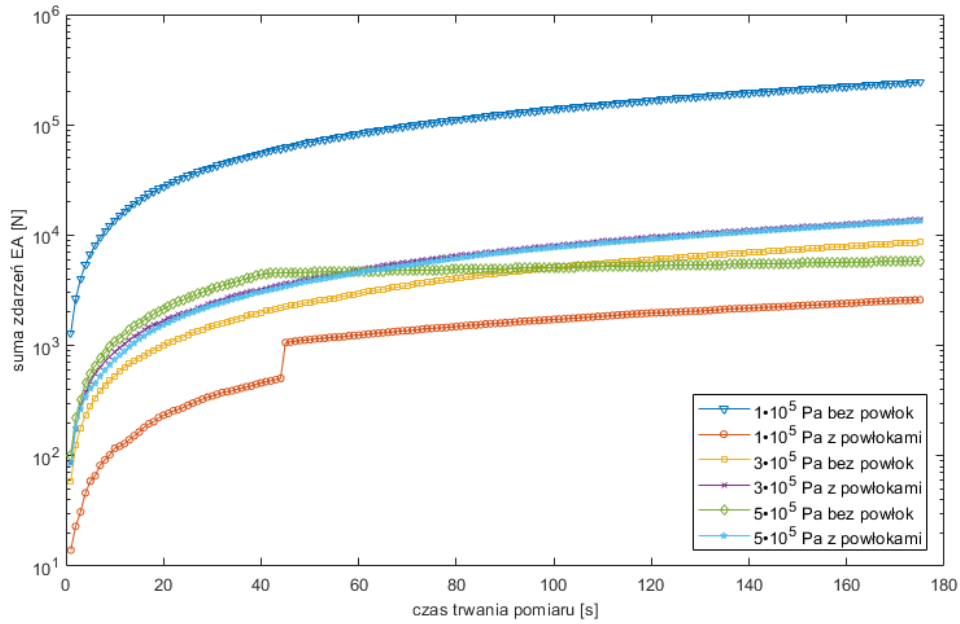
Zastosowanie powłok dielektrycznych znacząco wpływa na zarejestrowaną sumę EA tylko przy najmniejszym badanym ciśnieniu między elektrodami. W innych przypadkach, dla wartości większych niż $1 \cdot 10^5$ Pa, wartości są zbliżone dla każdej pary elektrod, zarówno z powłokami jak i bez nich.



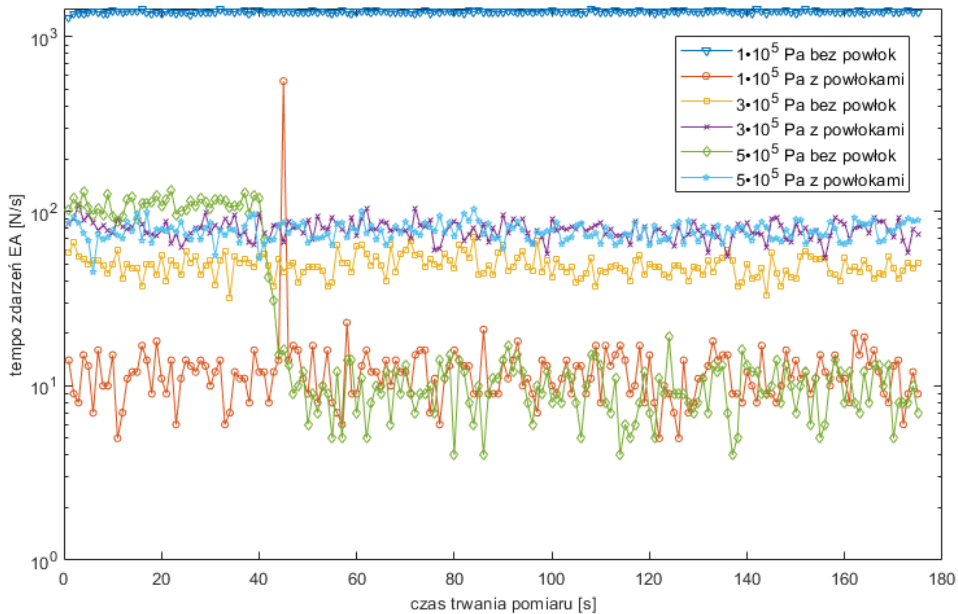
Rys. 5.15. Tempo zliczeń ($\Sigma EA/\Delta t$) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa

Podobnie jak w przypadku sumy zliczeń, również w przypadku tempa zliczeń zastosowanie powłok dielektrycznych znacząco wpływa na ten parametr tylko przy najmniejszym badanym ciśnieniu między elektrodami. W innych przypadkach wpływ jest

niewielki. Należy jednak zauważyć, że zmiany szybkości zliczania były mniejsze podczas badań elektrod powlekanych.

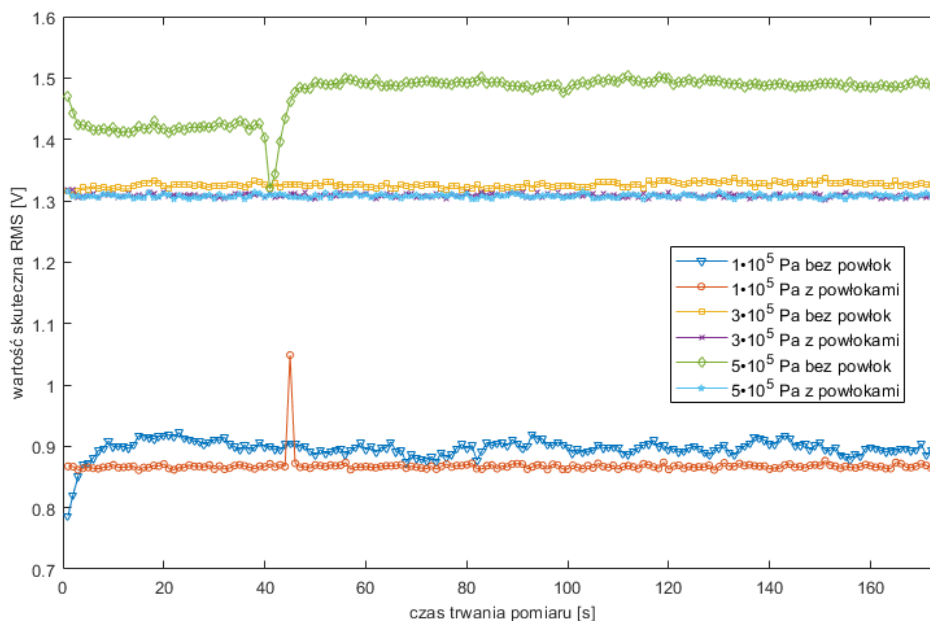


Rys. 5.16. Suma zdarzeń emisji akustycznej (ΣN) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa



Rys. 5.17. Tempo zdarzeń emisji akustycznej dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa, $5 \cdot 10^5$ Pa

W przypadku sumy i tempa zdarzeń można zaobserwować podobny związek jak obserwowany dla zliczeń, tj. znaczny spadek sumy i tempa zdarzeń dla najmniejszego ciśnienia między elektrodami i brak znaczących zmian dla większych ciśnień.



Rys. 5.18. Wartość skuteczna sygnału elektrycznej emisji akustycznej (A_{RMS}) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa

Analizując wpływ obecności powłok dielektrycznych na A_{RMS} sygnałów emisji akustycznej, można zauważyć, że dla wszystkich badanych ciśnień ten parametr osiąga niższe wartości w przypadkach, w których elektrody były pokryte dodatkowymi powłokami dielektrycznymi. Aby uzyskać pełniejsze informacje na temat wpływu powłok dielektrycznych na sygnały EA, przeprowadzono rozszerzoną analizę pojedynczych zliczeń i parametrów pojedynczych zdarzeń. Określono średni i średni czas trwania pojedynczego zliczenia i zdarzenia, a także średnią i medianę amplitudy zliczeń i zdarzeń. Dodatkowo określono parametry statystyczne, tj. kurtozę i skośność. Wyniki tych obliczeń podano poniżej w tabelach 5.3 i 5.4.

TABELA 5.3.
 Statystyka czasów trwania sygnałów EA – zliczenia

Ciśnienie		Średni czas trwania pojedynczej emisji [ms]	Mediana czas trwania pojedynczej emisji [ms]	Skośność czas trwania pojedynczej emisji [-]	Kurtoza czas trwania pojedynczej emisji [-]
$1 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	0,2249	0,1740	2,0495	8,6069
	z powłoką	0,1450	0,1160	5,0300	38,1965
	zmiana względna	-35,53%	-33,33%	145,43%	343,79%
$3 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	3,1854	2,2250	2,0321	9,2602
	z powłoką	2,2429	1,5800	2,0134	8,9586
	zmiana względna	-29,59%	-28,99%	-0,92%	-3,26%
$5 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	5,1	1,9	3,5885	20,1503
	z powłoką	2,3	1,6	2,0342	9,3760
	zmiana względna	-54,90%	-15,79%	-43,31%	-53,47%

Wzrost ciśnienia w układzie zwiększa czas trwania pojedynczego zliczenia. Zastosowanie powłok zmniejsza te czasy o kilkadziesiąt procent. Ponadto wraz ze wzrostem ciśnienia rośnie wartość kurtozy, tj. wyniki są bardziej skoncentrowane wokół średniej po nałożeniu powłok. Przy niższych ciśnieniach ($1 \cdot 10^5$ Pa) ich rozpiętość wzrasta, a przy wyższych ciśnieniach przyjmuje niższe wartości niż w przypadku zastosowania elektrod bez powłok.

TABELA 5.4.
 Statystyka czasów trwania zdarzeń EA

Ciśnienie		Średni czas trwania zdarzenia [ms]	Mediana czas trwania zdarzenia [ms]	Skośność czas trwania zdarzenia [-]	Kurtoza czas trwania zdarzenia [-]
$1 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	0,2856	0,2740	1,8864	8,9903
	z powłoką	0,1768	0,1270	7,0650	78,9055
	zmiana względna	-38,10%	-53,65%	274,52%	777,67%
$3 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	20,1887	14,1155	1,9149	8,1774
	z powłoką	12,5904	8,7660	1,8893	7,7497
	zmiana względna	-37,64%	-37,90%	-1,34%	-5,23%
$5 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	30	8,7	4,2571	26,6504
	z powłoką	12,8	8,9	1,9454	8,3929
	zmiana względna	-57,33%	2,30%	-54,30%	-68,51%

Z analizy czasu trwania zdarzeń wynika, że wzrost ciśnienia powietrza w komorze powoduje wydłużenie czasu trwania zdarzenia. Z drugiej strony obecność powłok znacznie zmniejsza średni czas trwania zdarzenia, jednocześnie zmniejszając rozprzestrzenianie się tych zmian wraz ze wzrostem ciśnienia.

Następnie analizowano liczbę i amplitudy zdarzeń. Wyniki analiz przedstawiono w tabelach 5.5 i 5.6.

TABELA 5.5.
 Statystyka amplitud sygnałów EA

Ciśnienie		Średnia amplituda emisji [mV]	Mediana amplitudy emisji [mV]	Skośność amplitudy emisji [-]	Kurtoza amplitudy emisji [-]
$1 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	25.3	18.6	1.7922	12.4533
	z powłoką	26.5	18.8	2.0742	9.0811
	zmiana względna	4.74 %	1.08 %	15.73 %	-27.08%
$3 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	25.0	18.6	16.2746	406.8270
	z powłoką	24.8	18.7	15.8199	545.4866
	zmiana względna	-0.80%	0.54%	-2.80%	34.08%
$5 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	32.6	20.5	20.1519	430.5184
	z powłoką	24.9	18.7	13.8273	385.3488
	zmiana względna	-23.62%	-8.78%	-31.38%	-10.49%

Znaczący wpływ obecności powłok na amplitudy zliczeń dotyczy przypadku najwyższej wartości ciśnienia - średnia amplituda spada o ponad 20%, a mediana amplitudy o ponad 8%. Przy ciśnieniu atmosferycznym i $3 \cdot 10^5$ Pa zmiany są niewielkie. Jeśli chodzi o parametry statystyczne, to można zaobserwować większą dyspersję amplitud – spadek wartości skośności wraz ze wzrostem ciśnienia..

TABELA 5.6.
 Statystyka amplitud zdarzeń sygnałów EA

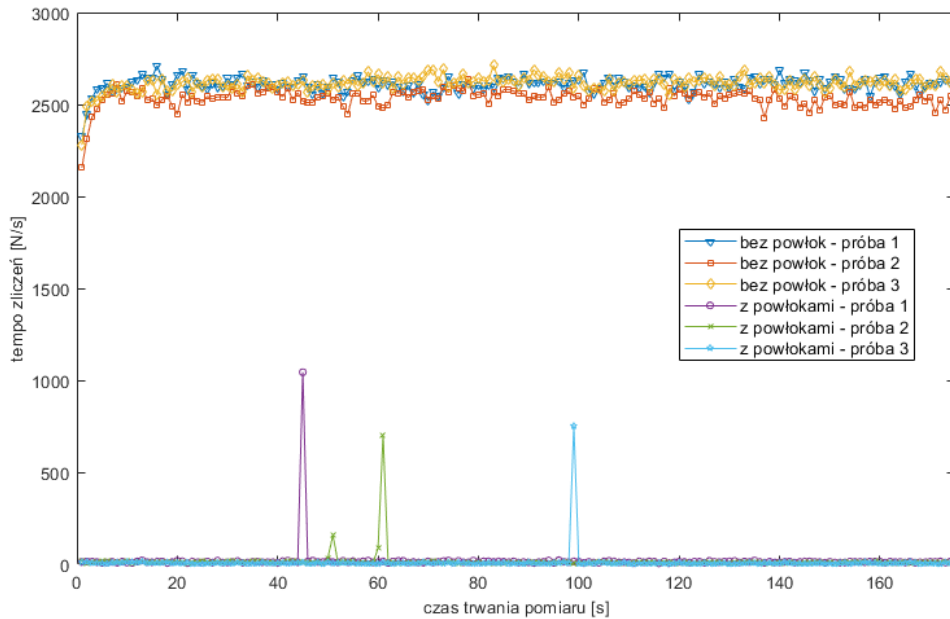
Ciśnienie		Średnia	Mediana	Skośność	Kurtoza
		amplituda	amplitudy	amplitudy	amplitudy
		zdarzenia	zdarzenia	zdarzenia	zdarzenia
		[mV]	[mV]	[-]	[-]
$1 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	225,5	144,7	0,7081	3,4737
	z powłoką	820,6	713,3	0,6370	3,6626
	zmiana względna	263,90%	392,95%	-10,04%	5,44%
$3 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	316,0	317,4	0,1279	3,7961
	z powłoką	322,5	321,5	0,1471	3,7423
	zmiana względna	2,06%	1,29%	15,01%	-1,42%
$5 \cdot 10^5$ Pa	bez powłok	370,6	351,3	1,8672	15,3050
	z powłoką	318,9	320,6	0,1475	3,7648
	zmiana względna	-13,95%	-8,74%	-92,10%	-75,40%

Zastosowanie dodatkowych powłok dielektrycznych znacznie (kilkukrotnie) zwiększa średnią i medianę amplitudy zdarzeń dla ciśnienia $1 \cdot 10^5$ Pa. Zwiększenie ciśnienia w układzie powoduje zwiększenie amplitud sygnału w przypadku układu bez powłok, podczas gdy amplitudy sygnału zmniejszają się w przypadku, w którym zastosowano powłoki.

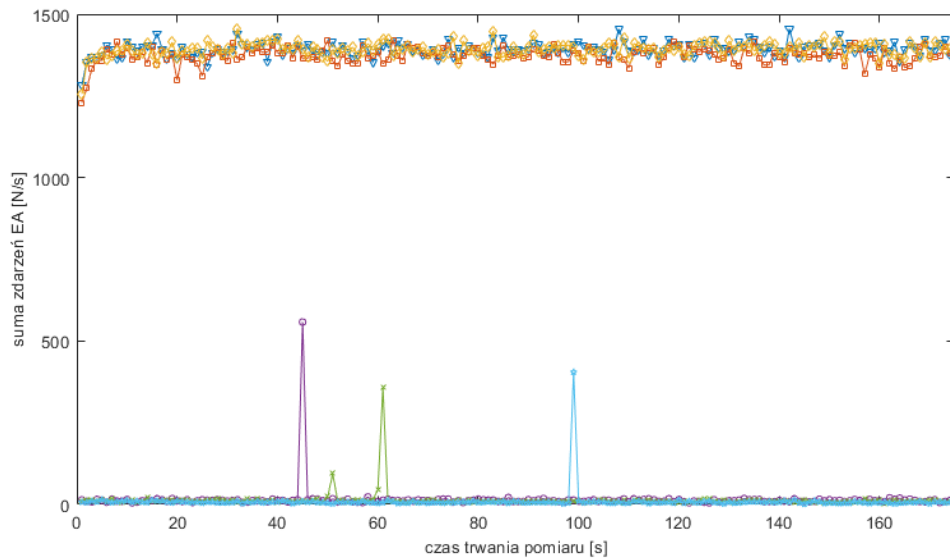
5.4.1 WPLYW WIELOKROTNYCH WYŁADOWAŃ NA PARAMETRY SYGNAŁÓW EMISJI AKUSTYCZNEJ

Kolejnym etapem badań była weryfikacja wpływu powłok dielektrycznych na parametry sygnałów EA przy wielokrotnym stosowaniu pary elektrod w danych warunkach napięciowych. Ten test został przeprowadzony poprzez wykonanie trzech pomiarów dla danej pary elektrod ze stałą odległością między elektrodami, przy jednoczesnym zachowaniu szczelności komory pomiarowej. W tym procesie napięcie było cyklicznie zwiększane do poziomu, przy którym nastąpiło wyładowanie w przestrzeni między elektrodami, powodując odcięcie zasilania. Celem tego testu było sprawdzenie, czy uszkodzenie powłoki dielektrycznej występujące podczas rozpadu jest wystarczające, aby wpłynąć na intensywność wnz, tj. parametry sygnałów EA. Rys. 5.19-

5.21 pokazują odpowiednio szybkość zliczania, szybkość zdarzeń, A_{RMS} przy odległości elektrody 3 mm i ciśnieniu $1 \cdot 10^5$ Pa.

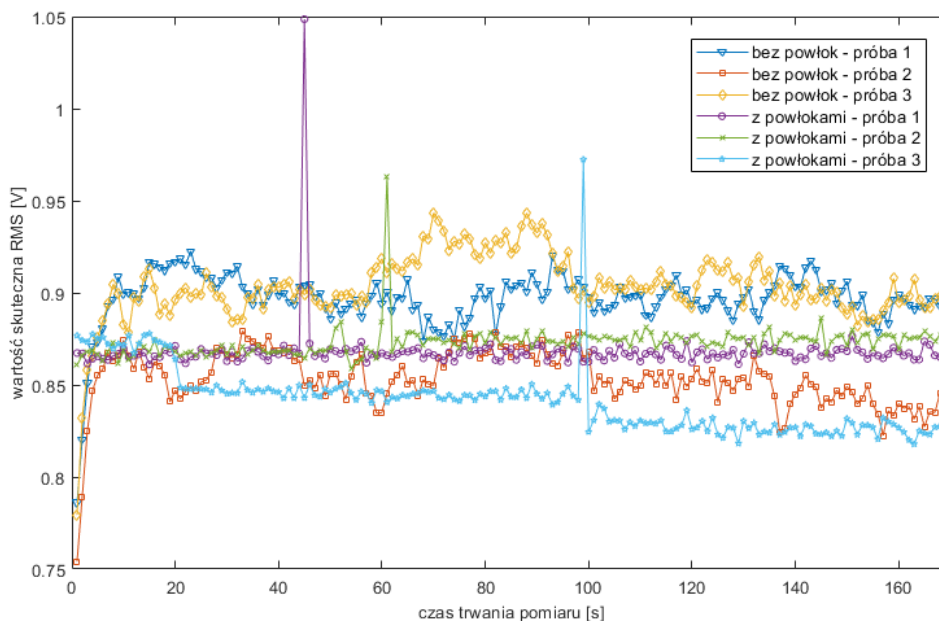


Rys. 5.19. Tempo zliczeń ($\Sigma EA/\Delta t$) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, podczas wielokrotnych wyładowań



Rys. 5.20. Suma zdarzeń emisji akustycznej (ΣN) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa, podczas wielokrotnych wyładowań

Przeprowadzone obliczenia wskazują, że poszczególne wyładowania w układzie nie wpływają znacząco ani na szybkość zliczania, ani na szybkość zdarzeń w analizowanym układzie wysokiego napięcia. Istnieją pewne różnice między poszczególnymi pomiarami, jednak są one niewielkie, a charakter ich zmian nie wykazuje żadnej regularności.



Rys. 5.21. Wartość skuteczną sygnału elektrycznej emisji akustycznej (A_{RMS}) dla odległości między elektrodami 3 mm i ciśnienia powietrza $1 \cdot 10^5$ Pa podczas wielokrotnych wyładowań

W przypadku A_{RMS} wyładowania nie tylko nie mają wpływu na wartości tego współczynnika, ale także, jak pokazano powyżej, wartości te nie zależą od obecności powłok. Można zauważyć, że rozbieżność wartości tego parametru w przeprowadzonych analizach nie przekracza 10%. W celu bardziej szczegółowego opisu uzyskanych wyników przeprowadzono analizę statystyczną wybranych parametrów sygnału dla poszczególnych testów, co przedstawiono w tabeli 5.7. Parametry sygnału pokazano przy odległości elektrody 3 mm i ciśnieniu $1 \cdot 10^5$ Pa.

TABELA 5.7.
 Parametry sygnałów EA podczas wyładowań wielokrotnych

	Nr próby	Średnia amplituda emisji [mV]	Średnia amplituda zdarzenia [mV]	Średni czas trwania pojedynczej emisji [ms]	Średni czas trwania zdarzenia [ms]	Średnia wartość skuteczną [V]
bez powłok	próba 1	25,3	227,8	0,225	0,375	0,887
	próba 2	24,8	224,0	0,209	0,331	0,833
	próba 3	25,2	227,8	0,222	0,365	0,857
z powłokami	próba 1	26,5	820,6	0,145	0,177	0,858
	próba 2	26,2	828,4	0,131	0,157	0,863
	próba 3	27,0	843,1	0,134	0,159	0,832

Przedstawiona powyżej analiza statystyczna potwierdza brak znaczących zmian parametrów sygnału emisji akustycznej związanych z pojedynczymi wyładowaniami w systemie izolacyjnym.

5.4.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WNZ

Weryfikacja hipotezy, że dodanie dodatkowych powłok wpływa na sygnały emisji akustycznej, a tym samym na aktywność wnz, wymagała przeprowadzenia szeregu pomiarów. Badania związane były z rejestracją i analizą sygnałów emisji akustycznej dla różnych warunków pracy systemu izolacyjnego, tj. różnych ciśnień w komorze dla przypadków, w których obie elektrody zostały pokryte izolacją elektryczną i bez tych powłok.

Badania te doprowadziły do następujących wniosków:

1. Porównując parametry długoterminowe, tj. sumę i tempo zliczeń, a także sumę i tempo zdarzeń, można zauważyć, że obecność powłok dielektrycznych znacznie zmniejsza wartości tych parametrów tylko dla ciśnienia atmosferycznego; zwiększenie ciśnienia nie powoduje znaczących zmian tych parametrów.
2. Analiza poszczególnych zdarzeń akustycznych i zliczeń dowiodła znaczących zmiany sygnałów po nałożeniu powłok:
 - a. niezależnie od poziomu ciśnienia w układzie, czas trwania poszczególnych zliczeń jest znacznie skrócony (np. od 29% do 55%, zależnie od ciśnienia),
 - b. wyższemu ciśnieniu w układzie towarzyszy zmniejszenie kurtozy i skośność czasu trwania pojedynczego impulsu lub zdarzenia EA,
 - c. amplitudy zliczeń przy niższych ciśnieniach są nieco wyższe niż w systemach bez powłok, ale wraz ze wzrostem ciśnienia maleją i stają się mniejsze niż w systemach bez powłok.
 - d. amplitudy zdarzeń zachowują się podobnie do amplitud zliczeń, ale w tym przypadku związek jest jeszcze wyraźniejszy; początkowo przy najniższych ciśnieniach amplitudy sygnału zwiększają się kilkukrotnie po nałożeniu powłok. Wraz ze wzrostem ciśnienia osiągają ten sam poziom, co w przypadku obudowy bez powłok. Podczas gdy z dalszym wzrostem ciśnienia stają się niższe niż poziom osiągnięty przez sygnały w niepowlekanym systemie - zarówno średnia, jak i mediana amplitudy.
3. Wiele pojedynczych wyładowań nie wpływa znacząco na parametry poszczególnych zliczeń i zdarzeń przy zachowaniu zależności dotyczących wyższych amplitud zliczeń i zdarzeń oraz krótszego czasu trwania zliczeń i zdarzeń dla systemów z powłokami.

Podsumowując, należy wskazać główny efekt stosowania powłok dielektrycznych, który może być związany z wpływem tych powłok na wnz. Wpływ ten jest związany ze zmianą kształtu pojedynczego sygnału EA. Sygnały te stają się krótsze przy jednoczesnym wzroście ich amplitudy, co może sugerować zmiany w wnz polegające na koncentracji energii podczas wyładowania. Potwierdzają to niewielkie zmiany wartości skutecznej podczas całego pomiaru. Można zatem stwierdzić, że zostało to osiągnięte dzięki dalszemu wygładzeniu powierzchni elektrody, co wynikało

z intensywnej emisji elektronów z pojedynczych mikroostrzy wraz z mniejszą liczbą tychże.

Dodatkowo można zaobserwować nagły wzrost intensywności emisji (pokazany na rysunkach). Uważa się, że zjawisko to wynika z wpływu układu pomiarowego i obecności stanów niestabilnych zachodzących podczas przełączania zaczepów transformatora przy jednoczesnym zwiększaniu napięcia) lub obecności pojedynczego ulotu obserwowanego podczas niektórych testów.

Brak wpływu pojedynczych wyładowań na sygnały EA, obserwowany podczas prób wielokrotnych, pozwala postawić hipotezę, że uszkodzenie powłok z powodu pojedynczych wyładowań jest nieznaczne, a wpływ tych uszkodzeń jest niewielki na sygnały EA.

5.4.3. ANALIZA MECHANIZMU WYŁADOWAŃ BADANYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Doświadczalnie stwierdzono, że dla większości gazów prawo Paschena, według którego napięcie przeskoku w gazie w polu jednostajnym jest funkcją iloczynu gęstości gazu (lub ciśnienia gazu) i odległości elektrod, jest spełnione tylko przy niższych ciśnieniach, gdy naprężenie przeskoku jest niskie. Po wzroście ciśnienia gazu, co prowadzi do wzrostu wytrzymałości elektrycznej gazu, zaobserwowano odchylenia wyników pomiarów od krzywej Paschena, przedstawiającej zależność napięcia przeskoku od iloczynu ciśnienia od odległości elektrod.

Badania przedstawione w pracy dotyczą układów z powietrzem oraz SF₆ jako izolacją wysokiego napięcia. Badano układy, w których ciśnienie powietrza p miało następujące wartości $1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa lub $5 \cdot 10^5$ Pa, a odległość między elektrodami d wynosiła 3 mm. Zatem iloczyn ciśnienia i rozstawu elektrod $p \cdot d$ wyniósł odpowiednio: $0,3 \cdot 10^5$ Pa·cm, $0,9 \cdot 10^5$ Pa·cm i $1,5 \cdot 10^5$ Pa·cm. Wartości te są zbliżone do wartości iloczynu $p \cdot d = 1 \cdot 10^5$ Pa·cm, która jest powszechnie uważana za granicę występowania dwóch mechanizmów: mechanizmu Townsenda i mechanizmu strimerowego. Zatem w badanych układach rozwój wyładowania był prawdopodobnie spowodowany wzajemnym oddziaływaniem obu mechanizmów. Wzrost ciśnienia powietrza w układach objętych eksperymentem ($1 \cdot 10^5$ Pa, $3 \cdot 10^5$ Pa i $5 \cdot 10^5$ Pa) prawdopodobnie spowodował zmniejszenie udziału w inicjacji przesunięcia mechanizmu Townsenda, a wzrost udziału mechanizmu streamera. Wzrost ciśnienia zwiększa prawdopodobieństwo występowania mechanizmu strimerowego.

W mechanizmie Townsenda przyjmuje się, że głównym źródłem wolnych elektronów jest ich emisja z katody, będąca wynikiem bombardowania katody przez jony dodatnie, które powstają podczas formowania się lawiny elektronów. Jony te

przyspieszają w polu elektrycznym, bombardują powierzchnię katody i penetrują jej warstwę powierzchniową, gdzie zderzają się z jej atomami i przekazują im swoją energię kinetyczną. W wyniku tego bombardowania może nastąpić wiele procesów fizycznych. Jednym z takich procesów jest emisja elektronów wtórnych przez katodę. Może być bardzo intensywny i odgrywa główną rolę w mechanizmie Townsenda inicjującym wstrząsy. Ponadto bombardowanie katody jonami dodatnimi może spowodować rozpylanie bombardowanego materiału, wytworzenie defektów w jego strukturze krystalicznej, domieszkowanie oraz całkowite zniszczenie jego struktury. Procesy te mogą być źródłem sygnałów emisji akustycznej.

Badania sygnałów emisji akustycznej generowanych przez systemy izolacyjne na etapie poprzedzającym rozgorzenie wykazały, że wzrost ciśnienia powietrza w systemach spowodował wydłużenie czasu trwania obserwowanych zdarzeń akustycznych. Ponadto stwierdzono, że obecność powłok na elektrodach znacznie skraca ten czas. Jest to prawdopodobnie wynikiem powłok dielektrycznych hamujących procesy inicjowania wyładowań.

Badając wpływ powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod układów na wartość skuteczną RMS generowanych sygnałów emisji akustycznej stwierdzono, że obecność powłok, niezależnie od wartości ciśnienia powietrza w układzie, obniżała wartość tego deskryptora. Wraz ze wzrostem wartości ciśnienia powietrza w układach, zwiększającym dominację mechanizmu inicjacji wyładowań streamera nad mechanizmem Townsenda, obserwowano wzrost amplitud rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej. Obecność powłok na powierzchniach elektrod skutkowałą spadkiem tych amplitud, im silniejszy tym wyższa wartość ciśnienia powietrza. Dodatkowo wzrost ciśnienia powietrza w badanych układach, który zmienił dominujący mechanizm inicjowania wyładowań na streamerowy, spowodował wydłużenie indywidualnych emisji akustycznych z badanego układu i jednoczesną stabilizację czasu trwania poszczególnych emisji akustycznych (wystąpiło znaczące obniżenie wartości kurtozy i czasu trwania skośności poszczególnych emisji akustycznych).

Badania potwierdziły, że powłoki dielektryczne na elektrodach przy wyższym ciśnieniu powietrza $5 \cdot 10^5$ Pa ($pd = 1,5 \cdot 10^5$ Pa·cm) mają szczególnie korzystny wpływ na właściwości elektroizolacyjne badanych układów. W tym przypadku obecność powłok dielektrycznych na elektrodach powodowała, że amplitudy obserwowanych zdarzeń akustycznych były mniejsze i charakteryzowały się znacznie mniejszą dyspersją (skośność i kurtozy).

Podsumowując, powyższe badania wskazują, że nałożenie powłok dielektrycznych o grubości 10...20 μm na powierzchnie elektrod układu izolacyjnego z powietrzem jako izolacją może pozytywnie wpłynąć na właściwości elektroizolacyjne układu izolacyjnego, zwłaszcza w przypadku rozgorzenia w powstaje w wyniku działania mechanizmu strimerowego, czyli gdy iloczyn wartości ciśnienia powietrza i odległości między elektrodami jest większy niż 10^5 Pa·cm.

6. PODSUMOWANIE, UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Projektowane i konstruowane nowe urządzenia elektroenergetyczne powinny nie tylko charakteryzować się wyższymi wartościami parametrów znamionowych, wysoką niezawodnością działania i dużą sprawnością energetyczną, ale także muszą mieć małe gabaryty. Najważniejszym czynnikiem decydującym o wymiarach urządzeń wysokonapięciowych jest wytrzymałość elektryczna zastosowanej w nich izolacji elektrycznej, a zaraz po niej rodzaj materiału elektrod i stan ich powierzchni. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdzają celowość stosowania powłok dielektrycznych jako pokryć powierzchni elementów wiodących prąd wysokonapięciowych urządzeń z elektroizolacją gazową.

Celem pracy było znalezienie materiału dielektrycznego, który naniesiony na powierzchnię w formie powłok gazowego układu izolacyjnego, zwiększy wytrzymałość elektryczną i jednocześnie spowoduje zwiększenie odporności powierzchni elektrod na uszkodzenia mechaniczne. Zakres pracy objął:

- 1) badania wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego ze sprężonym powietrzem i sześćfluorkiem siarki,
- 2) określenie wpływu rodzaju materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną badanych układów izolacyjnych,
- 3) dobranie materiału dielektrycznego na powłoki gazowego układu izolacyjnego,
- 4) badania mechanizmu inicjowania przeskoku w układach izolacyjnych z dielektrykiem na elektrodach, z wykorzystaniem metody wnz,
- 5) sformułowanie wniosków prowadzących do zwiększenia wytrzymałości gazowych układów izolacyjnych (weryfikacja otrzymanych wyników eksperymentów),
- 6) określenie kierunku przyszłych prac.

Przeprowadzone badania polegające na zbadaniu wpływu cienkich powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod gazowych układów izolacyjnych oraz weryfikacja uzyskanych wyników za pomocą rzeczywistego eksperymentu pomiarowego, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) opracowany układ oraz system pomiarowy umożliwia badanie układów izolacyjnych wypełnionych SF₆ lub powietrzem (lub innymi gazami) i może być wykorzystany do oceny ich właściwości elektrycznych;

- 2) za celowe uważa się stosowanie powłok dielektrycznych powierzchni elementów wiodących prąd wysokonapięciowych urządzeń z elektroizolacją gazową. Elektrody pokryte cienką warstwą dielektryczną prowadzą do znacznej poprawy napięcia przebicia w sprężonym powietrzu i SF₆;
- 3) wzrost ciśnienia gazu powoduje wzrost bezwzględnych napięć przebicia zarówno dla elektrod pokrytych jak i niepokrytych;
- 4) pokrycie powierzchni elektrod aluminiowych zastosowanymi powłokami tlenkowymi powoduje wzrost wytrzymałości elektrycznej powietrznego układu izolacyjnego, przy czym największy względny wzrost wytrzymałości elektrycznej, przekraczający 20%, powoduje zastosowanie powłoki o grubości 14...19 μm;
- 5) warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych zwiększa wytrzymałość elektryczną powietrznego układu izolacyjnego. Największy wzrost wytrzymałości elektrycznej, wynoszący 65%, otrzymano dla ciśnienia gazu równego 3·10⁵ Pa i próbki oznaczonej numerem 6;
- 6) warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych zwiększa wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego ze sprężonym SF₆. Największy wzrost wytrzymałości elektrycznej, wynoszący 27%, otrzymano dla ciśnienia gazu równego 3·10⁵ Pa;
- 7) badania układu izolacyjnego z SF₆, w którym warstwy tlenku aluminium na elektrodach nasycono cienką warstwą materiału elektroizolacyjnego (lakiery elektroizolacyjne) wykazały dodatkowe zwiększenie wytrzymałości elektrycznej. Największy procentowy przyrost wytrzymałości elektrycznej układu z SF₆ uzyskano dla ciśnienia SF₆ równego 3·10⁵ Pa i wynosił 104%;
- 8) zarówno dla powietrza jak i SF₆, jako medium izolacyjnego, nie odnotowano znaczącego przyrostu wytrzymałości elektrycznej gazowego układu izolacyjnego dla ciśnienia 10⁵ Pa;
- 9) punktowe uszkodzenia nie wpływają znacząco na jego wydajność izolacyjną. Początkowe napięcie przebicia jest zawsze wyższe niż napięcia kolejnych przebić. Domniema się, że dla zastosowań przemysłowych ważniejsze jest początkowe napięcie przebicia;
- 10) zastosowana warstwa tlenku aluminium, otrzymywana w procesie utleniania anodowego aluminiowej powierzchni ma wysoką temperaturę topnienia (około 2300 K), dużą adhezję do podłoża i bardzo dużą twardość, porównywalną z twardością kwarcytu. Chroni ona bardzo dobrze powierzchnię aluminium przed uszkodzeniami mechanicznymi (np. przy montażu), które to mogą spowodować obniżenie obniżenia wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego;
- 11) analizując parametry amplitudowe dla powierzchni badanych elektrod stwierdzono, że warstwa tlenku aluminium na powierzchniach elektrod aluminiowych zwiększa wytrzymałość elektryczną, ale przede wszystkim wytrzymałość mechaniczną gazowych układów izolacyjnych. Powstałe kratery na

- powierzchni elektrod z AL_2O_3 są mniejsze o prawie 50% w stosunku do elektrody bez tej powłoki;
- 12) badania powierzchni elektrod po przepływie prądu wykazywały, że ślady na powierzchniach elektrod były kraterami powstałymi wskutek uderzenia materiałem elektrody przeciwległej lub kraterami i śladami nadtopień uformowanymi w wyniku wyładowania lokalnego;
 - 13) analiza poszczególnych zdarzeń akustycznych i zliczeń (EA) dowiodła znaczące zmiany sygnałów po nałożeniu powłok dielektrycznych;
 - 14) wiele pojedynczych wyładowań nie wpływa znacząco na parametry poszczególnych zliczeń i zdarzeń EA przy zachowaniu zależności dotyczących wyższych amplitud zliczeń i zdarzeń oraz krótszego czasu trwania zliczeń i zdarzeń dla systemów z powłokami;
 - 15) zaobserwowano nagły wzrost intensywności emisji EA. Uważa się, że zjawisko to wynika z wpływu układu pomiarowego i obecności stanów nieustalonych zachodzących podczas przełączania zaczeów transformatora przy jednoczesnym zwiększaniu napięcia) lub obecności pojedynczego ulotu (*corona discharge*) obserwowanego podczas niektórych testów;
 - 16) brak wpływu pojedynczych wyładowań na sygnały EA, obserwowany podczas prób wielokrotnych, pozwala postawić hipotezę, że uszkodzenie powłok z powodu pojedynczych wyładowań jest nieznaczne. Aby zweryfikować powyższą hipotezę, konieczne są dalsze badania i analizy dotyczące wpływu dodatkowych powłok dielektrycznych na działanie systemu izolacji wysokiego napięcia.

Na podstawie dotychczasowych rezultatów badań, można wskazać, dalsze kierunki badań:

- poszukiwanie nowych materiałów dielektrycznych na powłoki elektrod, które mogą zwiększyć wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych,
- konstruowanie nowych gazowych układów izolacyjnych wykorzystujących jako medium izolacyjne sprężone powietrze lub SF_6 przy zastosowaniu dodatkowych powłok izolacyjnych na powierzchniach elektrod oraz ich eksploatacji,
- zastosowanie uzyskanych wniosków w diagnostyce wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych.
- prace nad doskonaleniem nieinwazyjnych metod diagnostycznych, w tym wykorzystanie zaawansowanych metod analizy sygnałów EA.

LITERATURA

- 1 Abdel-Gawad N.M., Dein A.Z., Lehtonen M.K., Experimental measurements of partial discharge activity within LDPE/TiO₂ nanocomposites, in: 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 – Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, s. 811.
- 2 Achatz, N.; Gorablenkow, J.; Schichler, U.; Hampton, B.; Pearson, J. Features and benefits of UHF partial discharge monitoring systems for GIS, Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials, Volume: 32008, 2005.
- 3 Arnold K.W., Interelectrode charge flow at high potential differences in vacuum, I ISDEIV, 1964, s. 215.
- 4 Arnold K.W., Vacuum breakdown phenomena at 1 million volts: A Postscript, II ISDEIV, 1966, s. 73.
- 5 Bagirov M.A., Kurbanov M.A., Shkileo A.V., Nuraliev N.E., Air discharge between dielectric coated electrodes, Soviet Physics - Technical Physics, t. 16, 1971, s. 1011.
- 6 Bednarek K., Optymalizacja kształtu i przekroju trójfazowych osłoniętych torów wieloprądowych izolowanych powietrzem, Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
- 7 Bełdowski T., Pawuła Z., Ślęski A., Analiza celowości wprowadzania do krajowego systemu elektroenergetycznego stacji i połączeń z izolacją z SF₆, sprawozdanie z zadania badawczego nr 1.6.1 Problemu Badań Podstawowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr R.I.16, Politechnika Warszawska, Warszawa 1961.
- 8 Bełdowski T., Tory wieloprądowe z izolacją gazową SF₆, Raport o pracach wykonanych w latach 1986-1990 w ramach CPBP nr 02.18, grupa tematyczna 1.4, Warszawa 1991.
- 9 Biuletyn informacyjny Polskich sieci Energetycznych: Budowa linii elektroenergetycznej 2x400 kV na terenie gminy Kórnik, PSE–Operator S.A., Warszawa 2006.

- 10 Boczar T., Cichoń A., Wotzka D., Kunicki M., Koziół M., Indicator analysis of partial discharges measured using various methods in paper-oil insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017.
- 11 Bolin P.C., Cookson A.H., Hopkin H.D., Corbett J., Marchlewski J.H., Hoscila G.A., Shimshock J.F., Manufacture and insulation of a Tyree conductor SF₆ insulated transmission Line, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, t. 101, 1982, s. 1966.
- 12 Bolin P.C., Trump J.G., Insulating vacuum gaps with dielectric cathode surfaces, *III ISDEIV*, 1968, s. 50.
- 13 Brochure prepared for U.S. Environmental Protection Agency: Byproducts of Sulfur Hexafluoride (SF₆) Use in the Electric Power industry, ICF Consulting, Fairfax 2002.
- 14 Bruce, F.M., Calibration of uniform field Spark gaps for high voltage measurement AT Power frequencies, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, t. 94, 1947, s. 138.
- 15 Castro B., Clerice G., Ramos C., Andreoli A., Baptista F., Campos F., Ulson J., Partial discharge monitoring in power transformers using low-cost piezoelectric sensors, *Sensors*, 16(8), Switzerland 2016.
- 16 Chalmers T.D., Qiu X.Q., Coventry P., The study of SF₆ mixtures, *Gaseous Dielectrics VIII*. Ed. L.G. Christophorou, USA 1999.
- 17 Company brochure of Asea Brown Boveri Limited, Fluid-filled cables for up to 600 kV DC and 420 kV AC, Bangalore, India 2009.
- 18 Cookson A.H., Electrical breakdown for uniform fields in compressed gases, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, t. 117, 1970, s. 269.
- 19 Cookson A.H., Review of high-voltage gas break down and insulators In compressed gas, *IEE Proc.*, t. 128, Pt. A, nr 4, 1981, s.303.
- 20 Datasheet of R3 α sensor, <https://www.physicalacoustics.com/by-product/sensors/R3a-30-kHz-Low-Frequency-AE-Sensor>.
- 21 Dobrzycki A., Zakrzewski S., Opydo W., Acoustic emission signals associated with prebreakdown state in air high voltage insulating systems, *Computer Applications in Electrical Engineering*, 13, 2010, s. 278.
- 22 Dobrzycki, A., Mikulski, S., Using of wavelet transform in the analysis of AE signals accompanying the process of epoxy resins electrical treeing, *Przegląd Elektrotechniczny* 92 (5), 2016, s. 221.

- 23 Dobrzycki, A., Mikulski, S.; Opydo, W., Analysis of acoustic emission signals accompanying the process of electrical treeing of epoxy resins. In Proceedings of the ICHVE 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2014.
- 24 Dobrzycki, A., Mikulski, S.; Opydo, W., Using ANN and SVM for the Detection of Acoustic Emission Signals Accompanying Epoxy Resin Electrical Treeing, Applied Sciences, 9, 1523, 2019.
- 25 Dobrzycki, A., Opydo, W.; Zakrzewski, S., Influence of Dielectric Coatings on AE Signals Generated in High Voltage Gas Insulated Systems. In Proceedings of the ICHVE 2018 International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2019.
- 26 Doepken H.C., Calculated heat transfer characteristics of air and SF₆, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, t. 89, nr 8, 1970, s. 1979.
- 27 El-Makkawy S.M., Electrode surface roughness initiated breakdown in compressed SF₆ gas, Conference on IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1994, p. 948.
- 28 Erven C.C., Wavre J.J., van Heeswijk R.G., 60 Hz vacuum breakdown studies in a dynamically pumped system, in: Proc. of IV International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Waterloo, Canada, 1970, s.219.
- 29 Fabiani D., Cavallini A., Saccani A., Toselli M., XLPE with hybrid nanocoating showing improved electrical properties, IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, t. 133, 2013, s. 116.
- 30 Flisowski Z., Technika wysokich napięć, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- 31 Florkowska B, Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2003.
- 32 Germin C., Jeannerot L., Rohrbach F., Simon D., Tinquely T., Technological development of the CERN electrostatic separator programme, II ISDEIV, 1966, s. 279.
- 33 Grzybowski S., Kuffel E., Electric surface strength of high-voltage insulators in vacuum, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, t. PAS-99, nr 5, 1982, s. 1788.

- 34 Grzybowski S., Opydo W., The influence of an insulating coat on the electrodes on the dielectric strength of vacuum gaps at 50 Hz alternating voltage, VI ISDEIV, 1974, s. 210.
- 35 Hershoff L., Internal reports High Voltage Research Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1947.
- 36 Hsu N., Breckenridge F., Characterization and calibration of AE sensors, Materials Evaluation, t. 39, 1, 1981, s. 60.
- 37 Hussain G. A., Shafiq M., Lehtonen M., Hashmi M., Online Condition Monitoring of MV Switchgear Using D -Dot Sensor to Predict Arc-Faults, : IEEE Sensors Journal, t. 15, Issue 12, 2015
- 38 Jedynak L., Dielectric coatings in vacuum gaps, I ISDEIV, 1964, s. 147.
- 39 Jedynak L., Towliati S.Y., High voltage vacuum insulation with epoxy-coated cathodes, Journal of Vacuum Science and Technology, 1974, t. 11, nr 1, s. 472.
- 40 Jedynak L., Vacuum insulation of high voltages utilizing dielectric coated electrodes, Journal of Applied Physics, 1964, t. 35, nr 6, s. 1727.
- 41 Junhao L., Xuato L., Zehui L., Xiu Y., A Novel GIS Partial Discharge Detection Sensor with Integrated Optical and UHF Methods, IEEE Transactions on Power Delivery 33, 2018, s. 2047.
- 42 Karta katalogowa rozdzielnic SN 4/TPM firmy ZPUE.
- 43 Katalogi i prospekty firmy Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania.
- 44 Katalogi i prospekty firmy OLYMPUS.
- 45 Katalogi produktów Elektrobudowa S.A., Trójfazowe przewody okapturzone typu ELPO, Katowice 2009.
- 46 Kónig D., Heinemeyer R., Scherb V., Breakdown voltages of dielectric-coated sphere-plane electrode configurations in high vacuum, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical insulation, Boston, 1988, s. 60.
- 47 Kreuger F.H., Gulski E., Sonneveld W.A., Diagnosis in GIS by statistical analysis of discharges, Netherlands, CIGRE 15/23-04, 30.08–05.09 1992.
- 48 Kuffel E., Opydo W., Wpływ materiału elektrod i temperatury na wytrzymałość elektryczną sześciofluorku siarki w polu jednostajnym, Archiwum Elektrotechniki, Zeszyt 4, t. XXIX, 1980, s. 841.
- 49 Kuffel E., Yializis A., Impulse break down of positive and negative rod-plane gaps in SF6-N2 mixtures, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, t. PAS-97, nr 6, 1978, s. 2359.

- 50 Kulas S., Tory prądowe i układy zestykowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- 51 Laudyn D.: Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- 52 Lesiński S., Jakość i niezawodność, Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz 1996.
- 53 Loeb L. B., Meek J. M., Mechanism of the electric spark, Stanford University Press, California, 1941.
- 54 Lorenc J., Musierowicz K., Kierunki rozwoju elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka nr 49, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005.
- 55 MacAlpine J.M.K., Breakdown of compressed nitrogen between dielectric coated electrodes, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Colloq. Gaseous Insulation, sec. 3, 1966, s. 1-5.
- 56 MacAlpine J.M.K., Cookson A.H., Impulse breakdown of compressed gases between dielectric covered electrodes, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, t. 117, 1970, s. 646.
- 57 Malewski R., Metody cyfrowe pomiarów i diagnozowania w technice wysokich napięć, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe, Elektryka, Zeszyt 99, Warszawa 1992.
- 58 Markalous S.M., Tenbohlen S., Feser K., Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15(6), 2008, s. 1576.
- 59 Markiewicz H., Wołkowiński K., Urządzenia elektroenergetyczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
- 60 Masetti C., Parmigiani B., Area effect on the electric al breakdown of compressed SF6 insulated system, in: III International Symposium on High Voltage Engineering, Paper nr 32.15, Milan 1979.
- 61 Mikulski, S.; Dobrzycki, A. Using of continuous wavelet transform for de-noising signals accompanying electrical treeing in epoxy resins, Przegląd Elektrotechniczny 92 (4), 2016, s. 26.
- 62 Mila J., Opydo W., Effect of coating electrodes with an aluminum oxide layer on the electric strength of unconditioned vacuum insulation systems, XVII ISDEIV, Berkeley 1996, s. 541.

- 63 Morgan J.D., Abdellah M., Impulse breakdown of covered cylinder in SF₆ and SF₆-gas mixtures, IEEE Transactions on Electrical Insulation, t. 23, nr 3, 1988, s. 467.
- 64 Morshuis P. H. F., Partial discharge mechanisms, Delft University Press, 1993.
- 65 Mościcka-Grzesiak H. (red.), Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. t. II, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- 66 Mościcka-Grzesiak H., Improvement of 50 Hz flashover strength In vacuum by dielectric coating of the relevant electrodes, V ISDEIV, 1972, s. 335.
- 67 Mościcka-Grzesiak H., O zagadnieniu elektrycznej wytrzymałości powierzchniowej materiałów i układów wysokonapięciowych w próżni, Rozprawy nr 58, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1973.
- 68 Nawrowski R., Patecki A., Zielińska M., Bednarek K., Tczewski A., Obliczenia elektrodynamiczne torów wielkoproudowych z izolacją gazową z uwzględnieniem zagięć, sprawozdanie z prac w IEP PP, Poznań 1992.
- 69 Nawrowski R., Tory wielkoproudowe izolowane powietrzem lub SF₆, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- 70 Nitta T., Yamada N., Fujiwara Y., Area effect of electrical breakdown in compressed SF₆, IEEE Transactions PAS-93, 1974, s. 623.
- 71 Oiu Y., Li R., Kuffel E., Liu M., Effect of electrode surface roughness on breakdown of SF₆ gas insulation, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, 1994, s. 93.
- 72 Okubo H.; Nishizawa K.; Okusu T.; Hayakawa N.; Endo F.; Yoshida M.; Uchida K., Partial discharge detection techniques under the condition of metallic particle adhering to solid spacer in SF. In Proceedings of the Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2008.
- 73 Opydo W., Analiza i badanie wpływu niektórych czynników stanu układu izolacyjnego próżniowego na jego wytrzymałość elektryczną przy napięciu przemiennym o częstotliwości elektroenergetycznej, Rozprawy nr 150, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1984.
- 74 Opydo W., Grzybowski S., Kuffel E., Influence of the thickness of a dielectric layer coating the surface of electrodes on insulating properties of vacuum under alternating voltage, IX ISDEIV, 1980, s. 48.

- 75 Opydo W., Grzybowski S., Kuffel E., Influence of the thickness of a dielectric layer deposited on the surface of electrodes on the insulating properties of vacuum gaps under alternating voltage, *Physica*, 1981, t. 104C, s. 76.
- 76 Opydo W., Grzybowski S., Kuffel E., The effect of coating electrodes with a dielectric layer on the electric strength of vacuum gaps, *IEEE PES Winter Meeting*, New York 1978, A 78 182-8.
- 77 Opydo W., Mila J., Batura R., Electric strength of vacuum systems with Co-Mo alloy coated Cu electrodes, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, t. 2, nr 2, 1995, s. 269.
- 78 Opydo W., Opydo J., Porównanie własności elektroizolacyjnych próżni i sześćiofluorku siarki, *Archiwum Elektrotechniki*, 1994, s. 403.
- 79 Opydo W., Opydo J., Wpływ powłoki tlenku na powierzchni elektrod aluminiowych na wytrzymałość elektryczną przerwy próżniowej przy napięciu przemiennym 50 Hz, *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka* nr 15, 1974, s. 13.
- 80 Opydo W., Opydo W., The effect of insulating coating applied to the surface of electrodes on the break down voltage and the field emission current of vacuum gaps at 50 Hz alternating voltage and 1.2/50 ms surges, *Conference Electrode Phenomena in Gas Discharges*, Bukareszt 1974.
- 81 Opydo W., *Problemy wysokonapięciowej izolacji próżniowej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- 82 Opydo W., Ranachowski J., *Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym*, PWN, Warszawa 1993.
- 83 Opydo W., *Właściwości gazowych i próżniowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
- 84 Opydo W., *Wpływ pokryć izolacyjnych elektrod na wytrzymałość elektryczną przerw próżniowych przy napięciu przemiennym 50 Hz i udarowym*, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1975.
- 85 Opydo W., *Zmiany stanu powierzchni elektrod układu izolacyjnego próżniowego pod wpływem napięcia stałego i przemiennego oraz ich wpływ na inicjowanie przeskoaku elektrycznego*, *Archiwum Elektrotechniki*, t. XXXV, Zeszyt 2, Poznań 1986.

- 86 PN-EN ISO 4287. Specyfikacja geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- 87 Praca zbiorowa pod kierunkiem Kosztaluka R., Technika badań wysokonapięciowych, T. II, Wydawnictwa Naukowo–Techniczne, Warszawa 1985.
- 88 Praca zbiorowa pod redakcją Fleszyńskiego J., Laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- 89 Praca zbiorowa, Elektroenergetyczne układy przesyłowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
- 90 Praca zbiorowa, Poradnik galwanotechnika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
- 91 Qui Y., Kuffel E., Dielectric strength of gas mixtures comprising SF₆, CO, c-C₄F₈ and SF₆, N₂, c-C₄F₈, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, t. PAS-102, nr 5, 1983, s. 1445.
- 92 Qui Y., Sun A., Kuffel E., Improved dielectric strength of SF₆ gas with a trichlorotrifluoroethane vapor additive, IEEE Transactions on Electrical Insulation, t. EI-22, nr 6, 1987, s. 763.
- 93 Rakowska A., Linia kablowa czy napowietrzna? Dylemat nie tylko techniczny, II Ogólnopolska Konferencja nt.: Energoelektryka na terenach wiejskich, Jachranka k. Warszawy, 2004.
- 94 Rakowska A., Linie kablowe wysokiego napięcia – stan obecny i tendencje rozwoju, Wiadomości Elektrotechniczne, Wydawnictwo SIGMA-NOT, 2005, nr 11, s. 28.
- 95 Rohrbach F., Pre-breakdown currents and microdischarges cross vacuum gaps, II ISDEIV, 1966, s. 83.
- 96 Rohrbach F., Some studies on high voltage vacuum break down cross large gaps. Investigation of the properties of oxide-coated aluminum electrodes, I ISDEIV, 1964, s. 393.
- 97 Rogowski W., Impulse potential and breakdown in gases, Archiv. Fur Elektrotechnik, B. 20, 1928, s. 99.

- 98 Salge G., Piemontesi M., Heitz C., König F., Impulse breakdown of gas-insulated gaps (10%SF₆/90%N₂) with thick coated electrodes, Conference on IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000, s. 409.
- 99 Seidel S., Mościcka-Grzesiak H., Wpływ dielektrycznych powłok elektrod na wytrzymałość powierzchniową izolatora w próżni. Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej nr 4, (1971), s. 13.
- 100 Siodła K., Identyfikacja rodzaju wyładowań niezupełnych w wybranych układach izolacyjnych metodą częstościowo-fazową, II Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IWN-94, Politechnika Poznańska, Poznań-Kiekrz, 25-28.09.1994.
- 101 Siodła K., Kuffel E., Fujinami H., Breakdown of SF₆ in non-uniform field gaps under combined DC, IEEE Transactions on Electrical Insulation, t. 28, nr 2, 1993, s. 253.
- 102 Siodła K., Kuffel E., Fujinami H., Breakdown voltage-pressure characteristics on non-uniform gaps in SF₆ under combined dc-standard lightning impulse voltages, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1991, s. 544.
- 103 Siodła K., Zjawisko mikrowyładowań w komorach gaszeniowych wyłącznika próżniowego, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1989.
- 104 Skipper D.J., McNeall P.I., Impulse-strength measurements on compressed-gas insulation for extra high voltage power cables, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, t. 112, s. 103-112, 1965.
- 105 Skubis J., Lorenc M., Measurements and analysis of acoustic emission standard pulses generated in Hsu-Nielsen source, Archives of Electrical Engineering, t. XLVII No 183-1/1998, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1998, s. 13.
- 106 Skubis J., Relationships between acoustic and electric descriptors of partial discharges, Archives of Electrical Engineering, t. XLVII No 184-2/1998, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1998, s. 120.
- 107 Skubis J., Spectrum of acoustic emission pulses generated by electric slide surface discharges in oil, Archives of Electrical Engineering, t. XLVII No 183-1/1998, PWN, Warszawa 1998, s. 25.
- 108 Skubis J., Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Politechnika Opolska 1998.

- 109 Słowikowska H., Słowikowski J., Podstawy diagnozowania urządzeń z SF₆ w oparciu o badania stanu gazu, VII Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”, Zakopane 1999.
- 110 Srivastava K.D., Chee-Hing D.J., Insulation performance of dielectric-coated electrodes in sulphur hexafluoride gas, IEEE t. EI-10, nr 4, 1975.
- 111 Srivastava K.D., van Heeswijk R.G., Dielectric coatings – effect on breakdown and particle movement in GITL systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, t. PAS-104, nr 1, 1985, s. 22.
- 112 Suwarno H., Partial discharge in high voltage insulating materials. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, 8(1), 2016, s. 147.
- 113 Syed B., Zhu J., Polcik P., Kolozsvari S., Håkansson G., Johnson L., Odén M., Morphology and microstructure evolution of Ti-50 at.% Al cathodes during cathodic arc deposition of Ti-Al-N coatings, Journal of Applied Physics, 121(24), 2017.
- 114 Szczepański Z., Wyładowania niezupełne w izolacji urządzeń elektrycznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- 115 Szpor S., Dzierżek H., Winiarski W., Technika wysokich napięć, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1969.
- 116 Tian Y., Levin P.L., Davies A. E., Richardson Z., PD pattern identification using acoustic emission measurement and neural networks, 11th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH '99, London, United Kingdom, 23–27.08 1999.
- 117 Tian, Y. PD pattern identification using acoustic emission measurement and neural networks; 2005.
- 118 Venu Gopala Rao M., Nagesh Kumar G.V., Amarnath J., Kamakshaiah S., Srivastava K.D., Performance of Gas Insulated Substations with Metallic Particle Contamination under the Influence of Various Types of Voltages, ICHVE, Chongqing, China, 2008.
- 119 Wilson E.B., Wstęp do badań naukowych, PWN, Warszawa 1968.
- 120 Wira A., Zybert R., Laboratorium inżynierii wysokonapięciowej, Skrypt Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003.
- 121 Witos F., Szerszeń G., Opilski Z., Setkiewicz M., Olszewska A., Duda D., Maźniewski K., Szadkowski M., Calibration and Laboratory Testing of Computer Measuring System 8AE-PD Dedicated for Analysis of Acoustic Emission Signals

- Generated by Partial Discharges Within Oil Power Transformers, Archives of Acoustics, t. 42, nr 2, 2017, s. 297.
- 122 Wodziński J., Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- 123 Wójciki S., Zasady eksperymentu, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1964.
- 124 Wu M.; Cao H.; Cao J.; Nguyen H.L.; Gomes J.B.; Krishnaswamy S.P., An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2015.
- 125 Yaacob M. M., Alsaedi M. A., Rashed J. R., Dakhil A. M., Atyah S. F., Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors, Photonic Sensors, Springer Verlag, 2014.
- 126 Zakrzewski S., Próby modyfikacji powierzchni elementów wysokonapięciowych urządzeń elektrycznych, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 246, Warszawa 2010
- 127 Zakrzewski, S., Opydo, W., Effect of electrode material on electric strength of compressed air in uniform electric field, Poznan University of Technology Academic Journals: Electrical Engineering, 2010.
- 128 Zhang S., Morcos M.M., Srivastava K.D., On the Management of Metallic Particle Contamination in Gas Insulated Switchgear, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, t. 24, Issue 5, 2017.
- 129 Zhenyu Z., Fangcheng L., Hongyu L., Zhibing L., Yan L., Effect mechanism of dielectric-coated electrodes on metal particle lift-off in SF₆ gas, IET Journals, t. 2019, Issue 16, 2019, s. 2831.
- 130 Zyzak Piotr, Ocena stanu powierzchni odlewów po obróbce strumieniowo-ściernej przy użyciu mikroskopu firmy Olympus, XI Konferencja odlewnicza Technical, Kraków 2008.