

prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska  
Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Instytut Elektroenergetyki  
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań  
aleksandra.rakowska@put.poznan.pl

Poznań, 31.05.2022 r.



PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY  
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
*Szela*  
prof. dr hab. inż. Wojciech Szela

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgra inż. Sebastiana Zakrzewskiego**  
**pt.: „Wpływ powłok dielektrycznych na powierzchni elektrod na wytrzymałość elektryczną**  
**gazowych układów izolacyjnych”**

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo DR-012/15/2022  
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika  
prof. dra hab. inż. Wojciecha Szela z dnia 1.03.2022.

**1. Ogólna charakterystyka podjętej tematyki**

Izolacja gazowa jest medium izolacyjne szczególnie szeroko stosowanym w systemie elektroenergetycznym. Oczywiście najpowszechniej mamy do czynienia z powietrzem, ponieważ odstępy izolacyjne pomiędzy np. przewodami linii napowietrznej czy różnymi elementami urządzeń rozdzielczych, a budowa linii napowietrznych. Ze względu na dążenie do miniaturyzacji elementów urządzeń i aparatury elektrycznej szczególnie na poziomie wysokich i najwyższych napięć oraz do ograniczania powierzchni stacji elektroenergetycznych - wykorzystanie izolacji gazowej jest bardzo popularne i będzie się to nadal dynamicznie rozwijało. W tym przypadku poza powietrzem stosuje się sześćfluorek siarki SF<sub>6</sub>, mieszaniny SF<sub>6</sub> z azotem oraz tzw. gazy alternatywne. Pomimo niesłusznego przypisywania negatywnego oddziaływania SF<sub>6</sub> na środowisko, gaz ten nadal jest szeroko stosowany w urządzeniach rozdzielczych, rozdzielniach i rozdzielnicach, ale także w tzw. gazowych liniach energetycznych GIL (ang. *Gas Insulated Line*). Warto tutaj wspomnieć oddaną niedawno do eksploatacji w Chinach spektakularną dwutorową linię GIL na napięcie 1000 kV o długości 5,8 km, ułożoną pod rzeką Jangcy. Ale i na znacznie niższych poziomach napięć – gazowe układy izolacyjne są stosowane także w nowych, wdrażanych obecnie rozwiązaniach urządzeń rozdzielczych. Można, jako przykład wskazać użycie osuszonego powietrza o ciśnieniu rzędu 0,1-0,2 MPa w rozdzielnicach SN z tym medium, które nazwano DAIS (ang. *Dry Air Insulated Switchgear*). Ustalono, że zastosowanie suchego powietrza pozwala zachować odstępy izolacyjne porównywalne z tymi, które stosowane są w przypadku użycia SF<sub>6</sub>. Należy pamiętać,

AR

że bardzo ważne, w jakichkolwiek układach izolacyjnych, jest uzyskanie odpowiednio wysokiej wytrzymałości elektrycznej. Metodą podwyższenia wytrzymałości danego układu izolacyjnego jest stresowanie różnego rodzaju, przegród, ale także i umieszczenie na elektrodach czy biegunach urządzeń będących pod napięciem – różnego rodzaju osłon i powłok.

Uważam, że temat podjęty w rozprawie doktorskiej mgr inż. Sebastiana Zakrzewskiego jest nadal bardzo aktualny i jego realizacja ma duże znaczenie nie tylko naukowe, ale również powinno być rozpatrywane pod kątem osiągnięć technologicznych, inżynierii materiałowej oraz ochrony środowiska (np. dzięki przedłużeniu „życia” urządzeń, zwiększaniu ich parametrów użytkowych oraz stosowanie gazów przyjaznych dla środowiska).

## **2. Zakres i najważniejsze osiągnięcia rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 105 stron i składa się z sześciu rozdziałów oraz spisu literatury. Spis literatury to powołanie się na 130 pozycji (w tym 43 pozycje z ostatnich dwudziestu lat). W spisie tym odnalazłam 1 publikację autorską Doktoranta i 3 publikacje współautorskie.

W pierwszym rozdziale pracy Doktorant ogólnie wskazał, dlaczego problemy związane z izolacją gazową są nadal aktualne, pokazał przykłady jej stosowania oraz krótko scharakteryzował zawartość poszczególnych rozdziałów rozprawy. W rozdziale drugim opisał właściwości elektryczne gazowych wysokonapięciowych układów izolacyjnych skupiając się głównie na sprężonym powietrzu, sześćofluorku siarki SF<sub>6</sub> i azocie. W rozdziale tym omówiono także podstawowe czynniki wpływające na wytrzymałość elektryczną izolacyjnych układów gazowych. Doktorant dokonał przeglądu literatury odnoszącej się do zależności wytrzymałości elektrycznej układów gazowych od ciśnienia, zastosowanych elektrod (materiał elektrod, stan, kształt i wielkość powierzchni, sposób kondycjonowania itd.). Autor szczególnie skupił się na analizie literatury dotyczącej powłok dielektrycznych umieszczonych na elektrodach w izolacyjnych układach gazowych i ich wpływu na: wytrzymałość elektryczną, rozwój wyładowań, napięcie pierwszego przeskoku przy działaniu różnych rodzajów napięć i przy różnych panujących warunkach (rodzaj medium, ciśnienie, temperatura, różna grubość i różny materiał powłoki na elektrodzie itp.). Opisał także metody oceny stanu izolacji stałej w układach gazowych oraz metody detekcji oraz pomiaru parametrów wyładowań niezupełnych (wnz) w takich układach. Poza metodą klasyczną oraz oscylograficzną oceny wnz, omówiono także wykorzystanie metody emisji akustycznej, która to metoda została wykorzystana do badań naukowych w ramach rozprawy. Na rozdziale drugim właściwie kończy się przeprowadzony przez Doktoranta szeroki przegląd literatury naukowej.

W rozdziale 3 Doktorant wskazał przyczyny podjęcia tematu i cel realizacji rozprawy oraz sformułował tezę, a także podał zakres podjętych działań mających na celu udowodnienie przedstawionej tezy.

Teza rozprawy brzmi: *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.*

Od rozdziału czwartego przedstawione są oryginalne osiągnięcia Doktoranta. Rozpoczęto w podrozdziale 4.1 od szczegółowego opisu układu pomiarowego, z głównym elementem komorą gazową oraz całym systemem regulacji i sterowania – ułatwiającym wymianę medium gazowego, wymianę elektrod, a także kontrolę poszczególnych parametrów charakteryzujących badany układ izolacyjny. Opis jest czytelny i pokazuje kompleksowość postępowania w przygotowaniu stanowiska badawczego oraz potwierdza zdolność Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych. Kolejny podrozdział rozprawy poświęcono technologii przygotowania powierzchni elektrod oraz kontroli ich stanu. Tutaj też należy podkreślić wiedzę i doświadczenie Autora rozprawy w skomplikowanej i wymagającej znajomości procesów technologicznych, a także świadomości – jak silnie stan powierzchni elektrod w układach gazowych wpływa na tzw. parametry użytkowe układu. W tym miejscu należy podkreślić osiągnięcia Doktoranta w starannym i wymagającym odpowiedniej wiedzy przygotowywaniu kolejnych elektrod do badań, a także sprawdzaniu stanu ich powierzchni przy wykorzystaniu nowoczesnego narzędzia – jakim było wykorzystanie konfokalnego laserowego mikroskopu skaningowego LEXT. Konfokalny mikroskop zapewnił uzyskanie 3-wymiarowych obrazów ze zdecydowanie powiększonym kontrastem i rozdzielczością w stosunku do obrazów uzyskiwanych ze standardowych mikroskopów skaningowych. Z kolei do oceny m.in. chropowatości powierzchni elektrod Doktorant korzystał z modułowego systemu TOPO-01. Następnie w rozprawie opisano ogólne zasady wykonywania pomiarów wytrzymałości elektrycznej układów gazowych, a w tym koniecznego kondycjonowania wykonanych i odpowiednio przygotowanych elektrod „gołych” i z powłokami dielektrycznymi. W kolejnym podrozdziale 4.4 Doktorant przedstawił wykorzystywany układ do prowadzenia analizy sygnałów akustycznych generowanych przez wyładowania niezupełne zakładając, że wyładowania te rozwijają się z mikrostrzy na elektrodach w badanym izolacyjnym układzie gazowym. Doktorant opisał procedurę prowadzenia tego testu oraz przedstawił analizę przeprowadzaną z programie MATLAB otrzymanych wyników pomiarów i scharakteryzował zastosowaną analizę statystyczną wyników badań.

AR

Bardzo ważna w rozprawie doktorskiej jest treść rozdziału 5, w którym zawarto wyniki badań i ich analizę. Przedstawiono wyniki badania wytrzymałości elektrycznej powietrza oraz sześćiofluorku siarki przy różnych ciśnieniach i elektrodach wykonanych z różnych materiałów i elektrod bez powłoki oraz z powłoką z tlenku aluminium i powłokami dielektrycznymi o różnej grubości oraz z różnych materiałów (3 typy lakierów oraz dwa typy elastycznych powłok silikonowych). Następnie przedstawiono wyniki badania stanu powierzchni elektrod (z aluminium, miedzi i stali nierdzewnej) bez powłok i z powłoką tlenkową – poddanych działaniu przeskoków. W dalszej części zaprezentowano wyniki badania mechanizmu inicjowania przeskoku w gazowych układach izolacyjnych, w których elektrody były bez i z powłokami oraz przy różnym ciśnieniu powietrza. Analiza ta była oparta o zarejestrowane sygnały emisji akustycznej.

Treść rozdziału 6 to podsumowanie, uwagi końcowe i sformułowane przez Doktoranta wnioski dotyczące nie tylko przeprowadzonych badań i wykonanej analizy uzyskanych wyników, ale także i przeglądu literatury.

Podsumowując najważniejsze osiągnięcia Doktoranta stwierdzam, że postawiona w rozprawie teza została potwierdzona (co pokazano w wielu miejscach rozprawy, ale wystarczy spojrzeć na rysunek 5.6), a założony zakres badań zrealizowany. Oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta pozwoliły sformułować wartościowe wnioski dotyczące wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego ze sprężonym powietrzem oraz układu z sześćiofluorkiem siarki. Za dokonanie naukowe uważam także zbadanie wpływu na wytrzymałość elektryczną układu gazowego materiału elektrod oraz wpływu powłok dielektrycznych umieszczanych na elektrodach – w badaniach przy różnym ciśnieniu gazu. Wysoko oceniam także opracowaną przez Doktoranta technologię przygotowywania elektrod do badania w komorze, której wyposażenie i dostosowanie do procedury prowadzenia założonych badań – również wymagało od Autora głębokiej wiedzy „*techniczno/technologiczno-inżynierskiej*”. Wyniki przeprowadzonych badań mogą być wykorzystywane w praktycznych izolacyjnych układach gazowych. Pochwały wymaga także zastosowanie nowoczesnych narzędzi pozwalających na wnikliwą analizę otrzymanych wyników badań, a w tym wykorzystanie mikroskopu konfokalnego, umożliwiającego analizę trójwymiarową stanu elektrod i zastosowanie analizy sygnałów emisji akustycznej do oceny wyładowań.

Bardzo pozytywnym elementem rozprawy jest także wskazanie dalszych kierunków badań dotyczących zagadnień zawartych w ocenianej rozprawie.

Praca jest napisana w sposób staranny, językiem łatwym do zrozumienia oraz jest wzbogacona formą edycyjną pracy – z dobrą jakością rysunków i zdjęć.

AR

## Uwagi ogólne i dyskusyjne

Warto przytoczyć zakres wykonanych przez mgra inż. Sebastiana Zakrzewskiego działań, bo to pokazuje ogrom pracy i czasu poświęconego na realizację pracy doktorskiej. Działania te objęły: budowę stanowiska pomiarowego do badania wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych, wykonanie tych badań, gdy gazem było sprężone powietrze i sześćfluorek siarki, określenie wpływu rodzaju materiału elektrod, dobór materiału na powłoki dielektryczne na elektrodach, wykorzystanie emisji akustycznej do badania mechanizmu inicjowania przeskoku w badanych gazowych układach oraz sformułowanie wskazówek dla projektantów gazowych układów izolacyjnych, aby zapewnić jak najwyższą wytrzymałość elektryczną układu.

### Uwagi dyskusyjne:

1. Czy można oszacować żywotność powłok na elektrodach odnosząc się np. do liczby przeskoków?
2. Czy na podstawie wyników badania z zastosowaniem sygnałów emisji akustycznej można uszeregować odporność mechaniczną 5 zastosowanych powłok na elektrodach (3 lakiery oraz 2 powłoki silikonowe) i przy okazji – czym różniły się dwie elastyczne powłoki, silikonowe?
3. W podrozdziale 4.2 znalazło się zdanie dotyczące kształtu elektrod w prowadzonych badaniach: *Układ ten charakteryzuje się wyraźną granicą napięciową, przy której występuje przeskok, nie poprzedzony wyładowaniami niezupełnymi*. Proszę wyjaśnić przyczynę powstawania wzn, które oceniano przy użyciu emisji akustycznej w układzie przedstawionym na rysunku 4.12.

### I kilka uwag ogólnych:

- str. 11 – pierwszy akapit od góry strony: trudno jest stwierdzić „...badania prowadzone są do dnia dzisiejszego...”, gdy powołuje się na literaturę z 1999 i 2008 roku; przegląd literatury jest obszerny, ale w niektórych przypadkach warto by było sięgnąć po nowsze publikacje;
- str. 29 – pod rysunkiem znalazło się zdanie: „Kolejni badacze w pracach potwierdzili, że stosowanie mieszaniny SF<sub>6</sub> z azotem w różnych proporcjach pozwala na zwiększenie wytrzymałości izolacji w stosunku do czystego SF<sub>6</sub> czy N<sub>2</sub>”. Zgadza się, że mieszanina obu gazów ma wyższą wytrzymałość niż czysty azot – ale w jakich warunkach ma wyższą wytrzymałość niż czysty SF<sub>6</sub>?
- str. 30 – mam pytanie dotyczące rysunków 2.20 i 2.21. W publikacji [18] (niestety nie mam do niej dostępu) zajmowano się wytrzymałością elektryczną w „... for uniform fields



*in compressed gases*”, natomiast podano w podpisie rysunków średnicę elektrod – można więc przyjąć, że dotyczy to układu z płaskimi elektrodami. Czy na rysunkach jest to natężenie pola przy pierwszym przeskoku w danych warunkach?

- str. 30 – w podpisie rysunku 2.21 napisano „... w funkcji objętości SF6..” – raczej: procentowej zawartości SF6 w mieszaninie z azotem;
- str. 32 – ostatnie zdanie w podrozdziale 2.2: „ Z tego względu stosowanie tych powłok jako pokryć izolacyjnych powierzchni elementów wiodących prąd, przewodów osłoniętych można uznać za celowe.” – chyba należało napisać: za bezcelowe.
- str. 50 – czy rysunek 4.8 jest autorstwa Doktoranta?
- str. 50 – w 5 wierszu od dołu strony napisano o umieszczaniu powłok na elektrodach (lakiery i osłony silikonowe) – czy udało się uzyskiwać jednakowe grubości tych wszystkich powłok?
- 75-77 – ciekawe wyniki, jedynie szkoda, że nie ma podpowiedzi jak interpretować poszczególne kolory na zamieszczonych obrazach.

Uwagi dyskusyjne i ogólne w żadnym stopniu nie umniejszają mojej pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej, a zostały sformułowane jedynie w celu, aby je ewentualnie uwzględnić przy publikowaniu wyników badań podczas kontynuowania działalności naukowej przez Doktoranta.

### **3. Wniosek końcowy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie aktualnego i ważnego problemu naukowego w dyscyplinie naukowej *elektrotechnika* oraz potwierdza wiedzę teoretyczną i umiejętność samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych przez Doktoranta. Rozprawa w pełni spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz w pełni uzasadnia wniosek o nadanie tytułu doktora nauk technicznych w dyscyplinie *Elektrotechnika*. Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony na Wydziale Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej.