Prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Opole, 22 marca 2022 r.

WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI POLITECHNIKA POZNAŃSKA
15 -04- 2022
WPŁYNĘŁO

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg

RECENZJA

rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Sebastiana Zakrzewskiego pt.: „Wpływ powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod na wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych".

1. Podstawa wykonania recenzji

Niniejszym recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego rady dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Poznańskiej (DR-012/15/2022), zgodnie z uchwałą nr 19/2021-2022 rady dyscypliny, z dnia 23 lutego 2022 roku.

Promotorem rozprawy doktorskiej mgra inż. Sebastiana Zakrzewskiego jest profesor dr hab. inż. Władysław Opydo.

2. Znaczenie podjętej tematyki, teza naukowa

Problematyka nowych technologii odnosząca się do kabli elektroenergetycznych, naziemnych torów prądowych i kompletnych rozdzielnic izolowanych powietrzem lub sześciofluorkiem siarki jest aktualna i ma ciągle duże znaczenie techniczne, naukowe i ekonomiczne.

Doktorant w swojej rozprawie skupił się na dwóch aspektach związanych z wytrzymałością gazowych układów izolacyjnych. Pierwszym jest problematyka wytrzymałości elektrycznej

powietrza i sześciofluorku siarki. Drugim jest ocena wpływu powłok naniesionych na powierzchnie elektrod, na wytrzymałość elektryczną w jednostajnym polu elektrycznym, przy napięciu przemiennym 50 Hz. Problematyka wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych, szczególnie układów izolowanych sześciofluorkiem siarki, ciągle stanowi jedną z podstawowych części techniki wysokonapięciowej. Prace nad wykorzystaniem dla wzmocnienia wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych poprzez obecność powłok na powierzchniach elektrod, z uwagi na osiągnięcia w inżynierii materiałowej, są ważne i aktualne. Można bowiem w ten sposób zmniejszać wymiary urządzeń elektroenergetycznych.

Celem rozprawy zdefiniowanym przez Doktoranta (str. 42) jest „Analiza wpływu na wytrzymałość elektryczną gazowego układu izolacyjnego, warstwy dielektryka naniesionego na powierzchnie elektrod płaskich i na odporność powierzchni elektrod na uszkodzenia mechaniczne powierzchni elektrod wywołane przez wyładowania niezupełne".

Tezę rozprawy Doktorant sformułował następująco: „Powłoki izolacyjne na powierzchniach elektrod gazowych układów izolacyjnych mogą spowodować podwyższenie wytrzymałości elektrycznej tych układów i jednocześnie zwiększyć odporność elektrod na uszkodzenia mechaniczne będące efektem wyładowana, bądź spowodowane uderzeniem w powierzchnię elektrody".

Takie sformułowanie tezy wydaje mi się dość ogólne, tym bardziej iż w wyniku przeprowadzonego przez Doktoranta eksperymentu i wyników opisanych w rozprawie (rozdz. 4 i 5), tezę można by uszczegółowić o parametry techniczne. Sądzę iż byłoby to z korzyścią dla rozprawy, jednak sfomułowanie tezy przedstawione w rozprawie także uznaję za dopuszczalne.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa obejmuje 105 stron i jest zredagowana w formie sześciu rozdziałów. Zestawienie literatury wyszczególnia 130 pozycji, w tym 81 pozycji anglojęzycznych. Cztery pozycje literaturowe stanowią autorskie lub współautorskie prace Doktoranta.

Rozdział pierwszy stanowi standardowy wstęp do problematyki podjętej w rozprawie.

Obszerny rozdział drugi, obejmujący 29 stron, przedstawia omówienie teoretycznych zagadnień związanych z tematyką rozprawy. Rozdział ten jest opracowany i zredagowany w

oparciu o międzynarodową i krajową literaturę przedmiotu. Literatura zestawiona w spisie rozprawy, odnosi się w większości do tego rozdziału. W mojej opinii, niektóre zagadnienia przedstawione w tym rozdziale (np. rozdz. 2.1, rozdz. 2.3) mają podstawowy charakter, w technice wysokonapięciowej są ogólnie znane i jako takie, mogłyby być w rozprawie pominięte. Rozdział ten, stanowiący teoretyczne wprowadzenie do problematyki podjętej w rozprawie, jest opracowany poprawnie, w formie typowej dla rozpraw doktorskich.

Rozdział 3 (str. 42 i 43) przedstawia cel, tezę i zakres rozprawy.

Oryginalne osiągnięcia Doktoranta, stanowiące naukową wartość rozprawy, są przedstawione w rozdziale czwartym i w rozdziale piątym. Rozdział czwarty zawiera pięć podrozdziałów – każdy z nich uważam za ważny i stanowiący naukowe osiągnięcie Doktoranta. W podrozdziale 4.1 Doktorant przedstawia koncepcję stanowiska badawczego, a następnie charakteryzuje techniczne i metrologiczne parametry wykonanego przez siebie układu. Przygotowane stanowisko badawcze i ważne jego detale są w rozprawie dobrze zwizualizowane. Podrozdział 4.2 przedstawia procedurę i technologię przygotowania powierzchni elektrod oraz sposób kontroli jakości naniesionych powłok. W tym zakresie widoczna jest duża kompetencja i doświadczenie technologiczne Doktoranta. Obróbka chropowatości powierzchni elektrod, ich polerowanie, a następnie chemiczne procesy nanoszenia powłoki tlenkowej, mają decydujące znaczenie dla wzrostu wytrzymałości elektrycznej przygotowanych elektrod. Technologia nanoszenia na elektrodę powłoki tlenkowej jest także ważna dla uzyskania odporności elektrody na działanie wyładowań niezupełnych. Przyjęte przez Doktoranta procedury technologiczne uważam za ważne osiągnięcie Doktoranta. Dotyczy to także procedury oceny jakości powłok naniesionych na elektrody, z wykorzystaniem laserowego mikroskopu LEXT, umożliwiającego trójwymiarową analizę stanu powierzchni powłok, z rozdzielczością od 0,2 do 0,01 mikrometrów.

W podrozdziale 4.3 Doktorant przedstawił sposób kondycjonowania wykonanych przez siebie układów elektrod (bez powłok i z powłokami).

W podrozdziałach 4.4 i 4.5 Doktorant scharakteryzował wykorzystywany w badaniach układ do pomiarów parametrów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne występujące na mikroostrzach elektrod. Omówił sposoby analizy rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej oraz sposób statystycznej analizy tych wyników poprzez obliczenie kurtozy i skośności rejestrowanych przebiegów.

W piątym rozdziale rozprawy Doktorant przedstawił uzyskane wyniki swoich badań oraz ich analizę. Przedstawione wyniki można pogrupować następująco:

- Badania wytrzymałości elektrycznej powietrznych układów izolacyjnych z elektrodami pokrytymi powłokami dielektrycznymi (str. 64-70).
- Badania wytrzymałości elektrycznej układów z sześciofluorkiem siarki i elektrodami pokrytymi powłokami dielektrycznymi (str. 70-74).
- Analizy zmian powierzchni elektrod na skutek występowania przeskoków (str. 74-80).
- Badania mechanizmów inicjowania przeskoków, poprzez analizę rejestrowanych wyładowań niezupełnych mierzonych metodą emisji akustycznej (str. 80-91).

Rezultaty przedstawione w piątym rozdziale rozprawy uważam za najważniejszą jej część. Uważam, iż są one wartościowe poznawczo i naukowo mogą być także wykorzystane w przemysłowych technologiach budowy gazowych układów izolacyjnych.

Podsumowanie rozprawy, końcowe uwagi i wnioski zostały przedstawione w rozdziale szóstym (str. 92-94).

4. Ocena rozwiązania postawionego problemu badawczego

Dla zrealizowanego celu pracy, rozwiązania postawionego problemu badawczego i potwierdzenia tezy rozprawy, Doktorant zrealizował sześć zadań:

- Do badania wytrzymałości elektrycznej gazowych układów izolacyjnych zaprojektował i zbudował stanowisko badawcze wraz z układem pomiarowym.
- Wykonał pomiary wytrzymałości elektrycznej powietrza i sześciofluorku siarki, przy różnych ciśnieniach.
- Określił wpływ materiału elektrod na wytrzymałość elektryczną powietrza i szcześciofluorku siarki.
- Dobrał dielektryki na powłoki elektrod i wykonał odpowiednie elektrody z powłokami.

- Wykonał pomiary wytrzymałości powietrza i sześciofluorku siarki w układach elektrod z różnymi powłokami i bez powłok.
- Dobrał układ do pomiarów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania i wykonał ich pomiary. W oparciu o uzyskane wyniki przedstawił interpretację mechanizmów przebicia w badanych układach izolacyjnych.

Z przedstawionych w rozprawie wyników za ważne uznaję także przedstawienie technologii przygotowania elektrod płaskich o odpowiedniej porowatości i ich obróbkę poprzez anodowe utlenianie aluminium, wraz z dalszą obróbką chemiczną (rozdz. 4.2, str. 48). Wartościowe jest także przedstawienie procedury oceny stanu powierzchni wykonanych elektrod, poprzez trójwymiarową analizę, przy wykorzystaniu lasera UV.

Naukową wartością rozprawy są także wyniki pomiarów wytrzymałości elektrycznej układów z powietrzem i sześciofluorkiem siarki, w funkcji ciśnienia. Z uzyskanych wyników w tym zakresie, za najważniejsze uważam wyniki przedstawione na rys. 5.3 do 5.8, w tablicach 5.1 i 5.2 i na rys. 5.9 do 5.12 (str. 66-80).

Trzecim oryginalnym wątkiem rozprawy jest wykorzystanie do interpretacji wyników sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne występujące w sześciofluorku siarki i w powietrzu. Doktorant zaprezentował wyniki pomiarów klasycznych deskryptorów emisji akustycznej, a więc tempa i sumy emisji oraz tempa i sumy zdarzeń akustycznych. Wartościowe są wyniki przedstawione na rysunkach 5.14 do 5.17, wraz z ich statystycznym opracowaniem. Przedstawione wyniki dotyczą deskryptorów charakteryzujących emisję akustyczną generowaną przez wyładowana niezupełne występujące na mikroostrzach elektrod z powłokami i bez powłok (tablica 5.7)

Wymienione powyżej rezultaty stanowią oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Świadczą one o Jego umiejętnościach definiowania i rozwiązywania problemu naukowego i samodzielnego prowadzenia badań.

5. Kwestie dyskusyjne i uwagi do rozprawy

- Czy wyniki przedstawione w rozprawie, dotyczące możliwych uszkodzeń powłoki naniesionej na elektrody płaskie mogą być przeniesione na oddziaływanie wyładowań o większej energii? Wyładowania niezupełne o większej energii wystąpią przy większych odległościach między elektrodami i wyższych wartościach napięcia przebicia.
- W rozdziale 4.4 Doktorant przedstawia możliwości oceny wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej. Jako jeden z możliwych deskryptorów oceny podaje pomiar zdarzeń akustycznych związanych z wyładowaniami. Deskryptor ten jest jednoznacznie związany z fizyczną stroną zjawiska, czyli wyładowaniami które generują sygnały emisji. Dla właściwej interpretacji rejestrowanych wyników kluczowy jest właściwy dobór czasu zdarzenia akustycznego (obwiedni pojedynczego sygnału), związanego z rejestrowanym sygnałem. Proszę zatem o podanie, jaki czas zdarzenia akustycznego przyjął Doktorant podczas pomiarów i rejestracji przebiegów sygnałów emisji akustycznej.
- Wyjaśnienia wymaga sprawa występowania wyładowań niezupełnych w wykorzystywanym przez Doktoranta układzie (rys. 4.12). Badania i pomiary były wykonywane w układzie elektrod płaskich (z powłokami i bez powłok) z wyokrąglonymi brzegami. W takim układzie elektrod występuje jednostajne natężenie pola elektrycznego i wyładowania niezupełne nie powinny występować. Akapit dotyczący tej kwestii, lakonicznie zasygnalizowany na 41 stronie rozprawy, wydaje mi się niewystarczający. Proszę Doktoranta o odniesienie się do tej kwestii podczas obrony.
- Doktorant w rozdziale 4.2 przedstawia technologie przygotowania powierzchni elektrod płaskich, wykorzystywanych w badaniach. Czy nie byłoby celowe znormalizowanie tej procedury w odniesieniu do elektrod płaskich wykorzystywanych w innych badaniach prowadzonych w laboratoriach wysokonapięciowych? Stan powierzchni elektrody płaskiej jest szczególnie ważny w układach uwarstwionych i w układach wykorzystywanych do generacji wyładowań ślizgowych.

- Czym był uzasadniony długi czas (aż 180 s!) pomiarów sygnałów emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne; np. wyniki przedstawione na rys. 5.14 i 5.15?
- Co Doktorant rozumie pod terminem „czas trwania pojedynczej emisji" (str. 84, tablica 5.3) i pod terminem „pojedyncze wyładowanie" (str. 90).
- Literatura zamieszczona w rozprawie jest obszerna i różnorodna. Zwraca jednak uwagę fakt, że aż 82 pozycje literaturowe pochodzą sprzed 2000 roku.

Poniżej przedstawiam uwagi szczegółowe dotyczące drobnych pomyłek lub niezręczności redakcyjnych:

- str. 11 – wiersz 1,2 – sformułowanie: „Rodzaj zastosowanej izolacji wysokonapięciowej ma największy wpływ na gabaryty wysokonapięciowego urządzenia" – sformułowanie dyskusyjne,
- str. 18 – podpis pod rys. 2.6 – brak znaków interpunkcyjnych,
- str. 26 – w opisie wpływu zanieczyszczeń w sześciofluorku siarki na wytrzymałość elektryczną – brakuje cytowania prac prof. W. Kołtunowicza,
- str. 32 – ostatni wątek rozdz. 2.2 – powinno być: „raczej za niecelowe",
- str. 37 – wiersz 4,5 – przy charakterystyce metody DGA, brak informacji, iż wykrywa ona i identyfikuje także wyładowania niezupełne,
- str. 37 – wiersz 18 – uchyb redakcyjny; winno być „Z_m",
- str. 38 – podpis pod rys. 2.27 – winno być: „Podstawowe schematy układów...",
- str. 40 wiersz 4 – należy rozróżnić metody wibroakustyczne (f do 10 kHz) służące do diagnostyki stanu transformatora od metody emisji akustycznej (f do 1 MHz) umożliwiający detekcję, pomiar i lokalizację wyładowań niezupełnych.,
- str. 40 rys. 2.31 – w opisie rysunku nie uwzględniono możliwości lokalizacji,
- str. 47 wiersz 1 -winno być „lub" zamiast „oraz",
- str. 50 wiersz 23 – ile mikrometrów miała warstwa nasycającego materiału elektroizolacyjnego?,

- str. 54 – podpis pod rys. 4.11 jest nieprecyzyjny, nie ma możliwości fizycznej interpretacji przedstawionych obrazów,
- str. 69 – podpis pod rys. 5.6 – brak przecinka,
- str. 74 ostatni wiersz – winno być „na rysunkach 5.9 i 5.10",
- str. 75, 76 i 77, rys. 5.9 i 5.10 są bardzo ciekawe i efektowne, jednak w podpisach pod rysunkami brak jest legendy kolorów, która umożliwiłaby ilościową interpretację zjawisk,
- Str. 82 i 83 – szkoda, że rysunki 5.14 i 5.16 nie zostały poddane dokładniejszej interpretacji fizycznej,
- str. 87 rys. 5.19 i 5.20 – przedstawione na tych rysunkach wyniki ($\sum N$) budzą moje wątpliwości. Dlaczego zjawisko generacji akustycznej przez wyładowania ma dynamikę tylko w pierwszych 10 ms, a następnie jest tylko stan ustalony? ,
- str. 91 – przedstawiona przez Doktoranta interpretacja uzyskanych wyników wymaga dalszych badań i potwierdzenia,
- str. 94 – wnioski nr 15 i 16 przedstawione w podsumowaniu rozprawy budzą moją wątpliwość; wymagają potwierdzenia w dalszych badaniach.

Szczegółowe uwagi i komentarze przedstawione powyżej, mają w części charakter dyskusyjny i nie wpływają na ocenę recenzowanej rozprawy, która jest jednoznacznie pozytywna. W mojej ocenie rozprawa nie wymaga zmian ani uzupełnień.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Sebastiana Zakrzewskiego pt.: „Wpływ powłok dielektrycznych na powierzchniach elektrod na wytrzymałość elektryczną gazowych układów izolacyjnych" spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich określone w artykule 13 Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki (Ustawa z dnia 14 marca 2003 roku, wraz z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2017 r poz. 1789).

Autor we właściwy sposób rozwiązał podjęty przez siebie problem badawczy i udowodnił tezę naukową sformułowaną w trzecim rozdziale rozprawy. W mojej ocenie rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie elektrotechnika, wskazuje na ogólną wiedzę Doktoranta w tej dyscyplinie i potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej.

Wnioskuję do Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Sebastiana Zakrzewskiego do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Skubis