

prof. dr hab. inż. Sebastian Borucki  
Politechnika Opolska  
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki  
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej  
ul. Prószkowska 76, budynek 2  
45-758 Opole

Opole, 28-12-2024 r.

## RECENZJA

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Lewandowskiego pn.: „Wpływ długotrwałego działania wyładowań niezupełnych na mufy kablone SN do kabli z izolacją fluoropolimerową (FEP)”**

#### **Podstawa formalna wykonania recenzji:**

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie – Pana dra hab. inż. Pawła Dworaka, prof. ZUT, zgodnie z uchwałą nr 34 z dnia 17 października 2024 r. Promotorem rozprawy jest Pan dr hab. inż. Szymon Banaszak, prof. ZUT, a promotorem pomocniczym Pan dr inż. Andrzej Mrozik.

#### **1. Ocena aktualności tematu, celu i zakresu rozprawy**

Linie elektroenergetyczne średniego napięcia (SN), będące w administracji Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD), są bardzo ważnym elementem sieci zasilającej, gdyż biorą one bezpośredni udział w procesie dystrybucji energii elektrycznej od głównych stacji rozdzielczych do odbiorców końcowych, takich jak: gospodarstwa domowe, przemysł, czy instytucje publiczne. W dobie rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną, szeroko pojętej urbanizacji, czy aspektów ochrony środowiska, coraz większym zainteresowaniem OSD na poziomie napięć od 1 kV do 36 kV cieszą się linie kablone SN, które zaczynają stanowić kluczowy element rozwoju nowoczesnych systemów elektroenergetycznych, stopniowo wypierając z niego linie napowietrzne. Stałe zwiększanie się ilości nowo budowanych linii kablowych SN wynika przede wszystkim z ich relatywnie dobrej odporności na złe warunki atmosferyczne, w tym silne wiatry, oblodzenia, czy burze, co sprawia że są one mniej awaryjne w stosunku do tradycyjnych linii napowietrznych. Ponadto, budowa linii kablowych SN wyraźnie redukuje ryzyko awaryjnego wyłączenia ciągu zasilającego, do którego mogłoby dojść na skutek innych czynników zewnętrznych, np.: zbliżenia konarów drzew do przewodów fazowych; mechanicznego uszkodzenia konstrukcji wsporczej słupa i/lub izolatora; czy zwarcia spowodowanego przez ptaki, co dodatkowo zwiększa ich wartość w kontekście stabilności i niezawodnej pracy całego systemu elektroenergetycznego.

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, w produkcji kabli SN wykorzystywano różne technologie, a w opinii recenzenta za kluczowe z nich można uznać: PILC – kable z izolacją papierową nasączoną syciwem izolacyjnym (od lat 20. XX wieku); PE – kable z izolacją polietylenową

nową (od lat 60. XX wieku); PVC – kable z izolacją z polichlorku winylu (od lat 70. XX wieku) oraz XLPE – kable z izolacją z polietylenu sieciowanego (od lat 90. XX wieku). Wymienione powyżej technologie są powszechnie stosowane i od wielu lat skutecznie zweryfikowane pod kątem ich przydatności w typowych warunkach eksploatacji zawodowych sieci elektroenergetycznych SN, których temperatura pracy nie przekracza zwykle poziomu 70 °C. Niestety, wraz z rozwojem technologicznym i aktualnymi wymaganiami przemysłu, używane do tej pory materiały izolacyjne i stosowane przy budowie kabli SN rozwiązania technologiczne nie są już wystarczające i koniecznym jest poszukiwanie innowacyjnych rozwiązań zapewniających bezawaryjną pracę systemów zasilania SN, w szczególności w wyższym zakresie temperatur (> 100 °C) oraz przy równoczesnym zachowaniu wymaganego poziomu odporności chemicznej i mechanicznej zastosowanego dielektryka.

Grupą nowoczesnych materiałów izolacyjnych spełniających powyższe wymagania są m.in. fluoropolimery, wśród których wyróżnia się: PTFE (politetrafluoroetylen, teflon – izolacja kabli, uszczelki); FEP (fluorowany etylen propylenu – izolacja wysokotemperaturowych kabli odpornych na chemikalia); PFA (perfluoroalkoxy – podobne właściwościami do PTFE i FEP, lecz wyższa elastyczność). Przeprowadzone na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat badania naukowe i próby eksperymentalne doprowadziły już do opracowania skutecznych technologii wytwarzania kabli SN z izolacją fluoropolimerową, a wdrożone rozwiązania cechują się m.in.: wysoką odpornością termiczną (praca ciągła do ok. 200 °C), wytrzymałością na oddziaływanie agresywnego środowiska (kwasów, zasad, rozpuszczalników, gazów), hydrofobowością, wysoką wytrzymałością elektryczną, niskim poziomem strat dielektrycznych, odpornością na promieniowanie UV, czy wysoką odpornością na uszkodzenia mechaniczne. Należy jednak podkreślić, że bezawaryjnie eksploatowana w danych warunkach środowiskowych linia kablowa SN, to nie jedynie dobrze wytworzony przez producenta i odpowiednio dobrany przez projektanta kabel elektroenergetyczny, ale przede wszystkim skutecznie dopasowany i zainstalowany osprzęt kablowy, który jak wskazują literaturowe statystyki uszkodzeń linii kablowych, w zdecydowanym stopniu wpływa na ich niezawodną pracę. Aspekt ten jest w szczególności istotny w przypadku kabli SN wytwarzanych na bazie izolacji FEP (fluorowany etylen propylenu). Wprawdzie FEP jest materiałem o bardzo dobrych właściwościach fizyko-chemicznych i dielektrycznych, niemniej jednak produkcja głowic, czy muf kablowych dla tego rodzaju materiału izolacyjnego wymaga specjalistycznego podejścia, nie tylko w zakresie technologii ich projektowania, lecz również opracowania właściwych procedur ich starannego montażu. FEP jako materiał o twardej strukturze jest dość trudny w obróbce mechanicznej i wymaga zastosowania dużej precyzji w procesie instalacji głowic lub muf kablowych. Zaprojektowany do kabli SN z izolacją FEP osprzęt musi cechować się także odpowiednią wytrzymałością mechaniczną, odpornością na warunki środowiskowe, szczelnością, a przede wszystkim wymaganą wytrzymałością elektryczną. Jakikolwiek błędy w zaprojektowaniu, czy niedokładności podczas montażu głowic/muf na kablu z izolacją FEP, np. poprzez: niewłaściwe uszczelnienie, zastosowanie nieodpowiednich materiałów izolacyjnych, błędy w wysterowaniu rozkładem pola elektrycznego za pomocą ekranów półprzewodzących, mogą doprowadzić do generacji wewnętrznych wyładowań niezupełnych (WZN), których konsekwencją będzie zwarcie i uszkodzenie danej linii kablowej SN. Dodać również należy, że głowice lub mufy muszą być również dopasowane do konkretnego rodzaju kabla SN. Ze względu na różnorodność konstrukcji kabli z izolacją FEP, dobór odpowiedniego osprzętu kablowego stano-

wi zatem dość poważne wyzwanie naukowo-inżynierskie, szczególnie jeśli kabel SN posiada dodatkowe warstwy półprzewodzące, ekranujące lub powłoki ochronne.

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgra inż. Radosława Lewandowskiego została zrealizowana przy współdziałaniu firmy Habia Cable Sp. z o.o. w ramach projektu „Doktorat wdrożeniowy”, 4. edycja na lata 2020-2024. Tematyka opiniowanej pracy doktorskiej dotyczy próby zaprojektowania, stworzenia prototypu, a następnie przebadania w warunkach laboratoryjnych autorskiego rozwiązania technicznego w postaci mufy kablowej przystosowanej do pracy z kablami SN z izolacją FEP, które eksploatowane są w podwyższonej temperaturze (co najmniej 120 °C). Podjęte przez autora badania wynikały z realnej potrzeby opracowania innowacyjnej konstrukcji mufy kablowej SN, która mogłaby zapewnić efektywne i skuteczne jej wykorzystanie w warunkach przemysłowych, na seryjnie produkowanych od 2021 r. przez firmę Habia Cable, pod nazwą Zeroarc®, wysokotemperaturowych kablach HTMV (ang. *High Temperature Medium Voltage*) w izolacji FEP. Niewątpliwie, zastosowanie od 2017 r. przez Habia Cable materiału FEP na izolację kabli SN było innowacyjnym rozwiązaniem technicznym, gdyż dzięki niemu możliwym stało się zasilanie urządzeń elektrycznych SN eksploatowanych w wysokiej temperaturze (nawet do 200 °C) i jednocześnie pracujących w otoczeniu agresywnego środowiska (np. ogrzewanie rurociągów z ropą naftową). Niestety zasadniczym ograniczeniem pełnego wykorzystania termicznych właściwości materiałowych zaproponowanego dielektryka stał się dostępny na rynku osprzęt kablowy (mufy, głowice), którego zakres pracy nie przekraczał temperatury granicznej 90 - 100 °C, a rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające pracę w temperaturze do 120 °C cechowały się dużymi rozmiarami. Jako cel wdrożeniowy opiniowanej dysertacji uznano potrzebę zaprojektowania i przebadania w warunkach laboratoryjnych nowej konstrukcji mufy kablowej, która spełniałaby wymagania normatywne, głównie temperaturowe, stawiane kablom SN z izolacją FEP. Dodatkowym założeniem przyjętym przez autora pracy, była także próba zaprojektowania mufy SN do kabla z izolacją FEP, która posiadałaby relatywnie małe gabaryty.

W opinii recenzenta zawarte w rozprawie doktorskiej Pana mgra inż. Radosława Lewandowskiego rezultaty przedstawiają propozycję autorskiego rozwiązania technicznego, stanowiącego projekt mufy kablowej przystosowanej do pracy z kablami SN z izolacją FEP w wysokiej temperaturze. Przeprowadzone przez doktoranta prace naukowo-badawcze i inżyniersko-techniczne w zakresie: opracowania nowej konstrukcji mufy kablowej do kabli z izolacją FEP; badań starzeniowych opracowanej konstrukcji mufy; budowy stanowiska do nieniszczących prób elektrycznych muf kablowych przed ich zamontowaniem na kablu; badań eksperymentalnych nad wpływem długotrwałego działania WNZ na opracowane prototypy muf kablowych wykazały, że zaproponowana przez doktoranta konstrukcja osprzętu (mufy) umożliwia łączenie kabli SN z izolacją FEP i ich pracę w temperaturze co najmniej 120 °C.

**Uwzględniając powyższe uważam, że tematyka poruszana w pracy jest bardzo aktualna, ma znaczenie praktyczne i została podjęta w ramach rzeczywistych potrzeb sektora elektroenergetycznego.**

Postawionym przez autora rozprawy głównym celem pracy było przedstawienie koncepcji i projektu mufy kablowej przystosowanej do pracy z kablami SN z izolacją FEP w wysokiej temperaturze, który będzie mógł w przyszłości zostać wdrożony na skalę przemysłową. Szczegółowa realizacja opiniowanej dysertacji dotyczy natomiast dwóch obszarów:

- a) celu wdrożeniowego:

- ✓ opracowanie konstrukcji muf kablowych do kabli z izolacją FEP wraz z doбором materiałów oraz technologii łączenia kabli z izolacją fluoropolimerową,
- b) celu badawczego:
- ✓ przeprowadzenie badań starzeniowych opracowanych muf i zaproponowanie stanowiska do nieniszczących testów elektrycznych mufy kablowej przed jej zamontowaniem na kablu,
  - ✓ zbadanie wpływu długotrwałego działania WNZ na mufy kablowe SN do kabli z izolacją FEP.

**Uważam, że cele pracy są ambitne i spełniają wymagania stawiane pracom doktorskim.**

Teza pracy została sformułowana w sposób jawny w podrozdziale na str. 10, pn. „*Cel, teza i zakres pracy*” i brzmi następująco:

*„Możliwe jest opracowanie i wykonanie mufy kablowej pracującej nieprzerwanie w temperaturze co najmniej 120 °C w długim okresie czasu, która spełni wymogi niewielkich wymiarów zewnętrznych i założonych właściwości mechanicznych i elektrycznych”.*

**Uważam, że przyjęty przez autora temat rozprawy: „*Wpływ długotrwałego działania wyładowań niezupelnych na mufy kablowe SN do kabli z izolacją fluoropolimerową (FEP)*” nie do końca koreluje z tezą pracy.** W mojej opinii temat recenzowanej rozprawy doktorskiej mógłby ulec zmianie, tak aby bezpośrednio nawiązywał on w swojej treści do głównego celu doktoratu wdrożeniowego, a zatem próby opracowania innowacyjnej konstrukcji mufy do łączenia kabli SN z izolacją FEP, przeznaczonej do pracy w obszarze wysokich temperatur. W obecnej formie temat pracy nawiązuje raczej do jednego z podjętych przez doktoranta zadań naukowo-badawczych zrealizowanych w ramach jego rozprawy i niestety w obecnej formie nie odzwierciedla on nadrzędnego celu, który został przyjęty przez autora w tezie opiniowanej dysertacji.

Aby udowodnić postawią tezę pracy przyjęto i zrealizowano następujące zadania:

- a. dokonano charakterystyki obecnie stosowanych rozwiązań technicznych w zakresie muf kablowych oraz metodyki łączenia (mufowania) kabli elektroenergetycznych SN wykonanych w różnych technologiach,
- b. przeprowadzono analizę i przegląd typowych defektów i usterek, które mogą powstać podczas łączenia kabli SN za pomocą muf kablowych,
- c. scharakteryzowano aktualnie wykorzystywane i rozwijane metody diagnostyki kabli oraz osprzętu kablowego średniego napięcia,
- d. wykonano badania i analizę właściwości materiałów izolacyjnych w aktualnie stosowanych mufach kablowych, w szczególności w aspekcie kompatybilności ich wykorzystania z kablami z izolacją FEP,
- e. przeprowadzono symulacje komputerowe rozkładu pola elektrycznego w zaprojektowanej mufie kablowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych w oprogramowaniu Argos2D,
- f. opracowano prototyp mufy kablowej SN, który może zostać wdrożony i wykorzystany do łączenia kabli z izolacją fluoropolimerową pracujących w obszarze wysokich temperatur,

- g. stworzono i przedstawiono procedurę montażu opracowanej konstrukcji wysokotemperaturowej mufy kablowej,
- h. zbudowano stanowiska pomiarowe oraz opracowano procedury testowe dla badanych próbek kabli FEP i prototypów wykonanych muf kablowych SN, które dotyczyły m.in.: pomiarów WNZ, pomiarów napięcia przebicia, kontrolowanego starzenia termicznego, czy cyklicznych badań temperaturowych,
- i. zrealizowano badania i ocenę wpływu długotrwałego starzenia wybranych materiałów izolacyjnych zastosowanych do wykonania prototypu mufy kablowej SN na generację WNZ z wykorzystaniem nieniszczących metod elektrycznych oraz radiograficznych,
- j. przeprowadzono badania i analizę wpływu długotrwałego starzenia termoelektrycznego złącz „kabel FEP - mufa kablowa - kabel FEP” na morfologię izolacji i powłoki oraz generację WNZ,
- k. dokonano oceny wyników badań starzeniowych zaproponowanej konstrukcji mufy kablowej SN w odniesieniu do możliwości jej ciągłej pracy przez okres około 20 lat.

## 2. Charakterystyka pracy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 216 stron, z czego główna treść pracy zawiera się na 134. kartach. Dysertacja zawiera: streszczenie w języku polskim i angielskim; wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń; wprowadzenie; cel i zakres pracy; 8 głównych rozdziałów; spis literatury obejmujący 116 pozycji, wśród których dominującą rolę odgrywają międzynarodowe publikacje wydane na przestrzeni ostatnich kilku lat, a także spis tabel oraz rysunków. Doktorant jest współautorem tylko 1 cytowanej w pracy pozycji, którą opublikowano w czasopiśmie *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (100 pkt.).

**Rozdział „Wprowadzenie”** przedstawia informacje na temat genezy podjętych przez doktora prac naukowo-badawczych zrealizowanych w ramach rozprawy. Rozdział ten zawiera także krótką charakterystykę treści zawartych w poszczególnych rozdziałach pracy.

W **rozdziale „Cel, teza i zakres pracy”** zawarto główne cele i tezę opiniowanej rozprawy oraz zakres przeprowadzonych przez autora rozważań naukowo-badawczych.

W **rozdziale pierwszy** przedstawiono ogólną charakterystykę kabli elektroenergetycznych średniego napięcia i omówiono ich rolę w dystrybucji energii elektrycznej. Rozdział ten zawiera również rys historyczny związany z rozwojem technologii i materiałów izolacyjnych stosowanych do budowy kabli SN, a także porównawcze zestawienia obrazujące różnice własności parametrów fizyko-chemicznych i elektrycznych poszczególnych dielektryków. Obszerną część tego rozdziału stanowią treści opisujące fluoropolimery, w szczególności fluorowany propylen etylenu (FEP), który od kilku ostatnich lat stanowi ogromne zainteresowanie producentów jako materiał izolacyjny stosowany do produkcji wysokotemperaturowych kabli SN. Rozdział zawiera również krótki przegląd literaturowy wyników badań przeprowadzonych w innych ośrodkach naukowo-badawczych nad procesami degradacji oraz starzenia materiału FEP pod wpływem wysokiej temperatury, silnego pola elektrycznego, czy długoterminowego oddziaływania wyładowań elektrycznych na jego powierzchnię.

**Rozdział drugi** omawia problematykę projektowania, montażu i eksploatacji muf kablowych SN. W rozdziale tym scharakteryzowano różne technologie produkcji i rodzaje wykonania muf, a także omówiono ich budowę oraz zastosowane w nich materiały. Szczegółowo omówiono

zagadnienie awaryjności pracujących w Polsce linii kablowych SN oraz zidentyfikowano najczęstsze przyczyny pojawiających się w nich uszkodzeń. Rozdział zawiera opis postawionych przez autora wymagań i założeń dla projektowanego i budowanego w ramach opiniowanej pracy prototypu wysokotemperaturowej mufy do kabli z izolacją FEP.

W **rozdziale trzecim** dokonano przeglądu aktualnie stosowanych w Polsce i na świecie metod diagnostyki kabli i muf średniego napięcia. W rozdziale tym dość szczegółowo omówiono znane metody pomiarowe, by następnie kilka z nich wykorzystać przy realizacji zadań badawczych mających na celu weryfikację i ocenę poprawności zaprojektowania oraz wykonania zaproponowanej przez doktoranta konstrukcji prototypu mufy do kabli z izolacją FEP.

**Rozdział czwarty** przedstawia opis obiektów stanowiących główny obszar zainteresowań naukowo-badawczych autora. W rozdziale tym zamieszczono charakterystykę wysokotemperaturowego kabla z rodziny Zeroarc® firmy Habia Cable, dla którego podjęto się próby zaprojektowania i stworzenia prototypu mufy, stanowiącej główny przedmiot podjętych przez doktoranta badań. Zasadniczą część niniejszego rozdziału stanowią treści związane z charakterystyką i doborem odpowiednich materiałów na poszczególne części składowe zaprojektowanej do pracy w wysokiej temperaturze mufy kablowej SN. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki przeprowadzonych przez doktoranta badań, które dotyczyły m.in.: oceny wytrzymałości stworzonego złącza na rozciąganie, czy określenia dopuszczalnej wartości rezystancji zestykowej połączenia prasowanego żyły głównej kabla Zeroarc®. Weryfikację przyjętych przez doktoranta założeń projektowych i opracowanej przez niego konstrukcji mufy SN przeprowadzono z użyciem oprogramowania Argos2D, bazującego na metodzie elementów skończonych – w omawianym rozdziale zawarto wyniki symulacji rozkładu natężenia pola elektrycznego w stworzonym osprzęcie wraz z ich omówieniem. Rozdział przedstawia również szczegółowy opis procedury montażu opracowanej i zbudowanej konstrukcji prototypu wysokotemperaturowej mufy kablowej do łączenia kabli Zeroarc® z izolacją FEP.

Metodykę realizacji przyjętych przez doktoranta prób badawczych, mających na celu weryfikację poprawności wykonania i działania zaproponowanej konstrukcji mufy kablowej SN, przedstawiono w **rozdziale piątym**. W rozdziale tym szczegółowo omówiono procedury diagnostyczne badanego osprzętu, które podzielono na trzy etapy: badania wstępne (pomiar wytrzymałości elektrycznej i WNZ, zdjęcia RTG), badania pomocnicze (pomiar WNZ), badania właściwe (pomiar WNZ przy starzeniu termoelektrycznym, pomiar WNZ podczas cyklicznego starzenia, pomiar wytrzymałości elektrycznej po starzeniu), co miało pomóc autorowi pracy w identyfikacji potencjalnych defektów poszczególnych elementów stworzonej mufy, także przed jej ostatecznym montażem na kablu z izolacją FEP (ścieżka tzw. badań śródoperacyjnych). Rozdział piąty zawiera charakterystykę stworzonych przez doktoranta stanowisk pomiarowo-badawczych, wykorzystanych układów pomiarowych, a także przyjęte przez autora warunki realizacji poszczególnych testów i prób diagnostycznych.

W **rozdziale szóstym** przedstawiono i omówiono rezultaty przeprowadzonych przez autora badań, które w szczególności dotyczyły: pomiarów WNZ i wartości napięcia przebicia 5. próbek kabli Zeroarc® bez starzenia termicznego; pomiarów WNZ i napięcia przebicia kolejnych 5. próbek kabli poddanych starzeniu termicznemu; wizualnej kontroli 2500 szt. wytworzonych zimnokurczy opracowanej mufy kablowej; przeprowadzenia analizy rentgenowskiej 1988 szt. zimnokurczy silikonowych (3976 zdjęć); wykonania pomiarów WNZ oraz prób wytrzymałości elektrycznej populacji 989 szt. zimnokurczy prototypu mufy. Treść niniejszego rozdziału zawiera szczegółowy opis przyjętej przez doktoranta metodyki, na podstawie której do dalszego etapu prac badawczych, mają-

cych na celu ocenę poprawności działania zaproponowanej przez niego konstrukcji wysokotemperaturowej mufy, wyłoniono 11 szt. zimnokurczy (zgrupowana baza to 2500 rekordów po 16 parametrów, 3976 zdjęć RTG, 3956 wykresów WNZ). W dalszej części rozdziału 6. przedstawiono i omówiono wyniki pomiarów WNZ, które otrzymano dla 11. próbek kabli z izolacją FEP z założonymi mufami – próbki typu „kabel-mufa-kabel”, przy czym 5 próbek nie posiadało wad montażowych, natomiast 6 z nich cechowało się delaminacją. Rozdział zawiera również wyniki prób dotyczących wyznaczenia napięcia przebicia próbek „kabel-mufa-kabel” bez stwierdzonych wad instalatorskich oraz rezultaty pomiarów WNZ, które wykonano po starzeniu termoelektrycznym próbek „kabel-mufa-kabel” z delaminacją. Dodatkowo, w rozdziale 6. zawarto wyniki prób laboratoryjnych, które uzyskano w trakcie cyklicznych badań temperaturowych próbek typu „kabel-mufa-kabel” z zaobserwowaną delaminacją.

**Rozdział siódmy** stanowi szczegółową analizę wyników badań i prób, które zrealizowano w ramach opiniowanej rozprawy, a których rezultaty i przyjętą metodykę przedstawiono w rozdziale 6. W kolejnych podrozdziałach omawianej części pracy, autor dokonał dość obszernej analizy i oceny otrzymanych danych, przy czym wnioskowanie zostało przeprowadzone praktycznie niezależnie dla każdego obiektu badawczego oraz przyjętego przez doktoranta mechanizmu testowego (badania termoelektryczne, cykliczne badania termiczne). Przyjętą przez autora ostateczną miarą oceny poprawności zaprojektowania i wykonania prototypu wysokotemperaturowej mufy SN do łączenia kabli Zeroarc® z izolacją FEP stały się w głównej mierze wyniki pomiarów wartości początkowego napięcia zapłonu WNZ generowanych wewnątrz badanych muf, jak również zmierzona dla danej konstrukcji wartość zgromadzonego ładunku pozornego. Rozdział 7. zawiera również omówienie rezultatów badań rentgenowskich oraz organoleptycznych (wizualnych) po rozcięciu muf, które przeprowadzono dla każdej z analizowanych próbek typu „kabel-mufa-kabel”, bezpośrednio po wykonaniu testów starzeniowych.

Podsumowanie i wnioski końcowe zawiera **rozdział ósmy**. W rozdziale tym doktorant stwierdza m.in., że opracowana i zaproponowana przez niego konstrukcja wysokotemperaturowego prototypu mufy kablowej spełnia oczekiwania termiczne i starzeniowe stawiane jej względem kabla Zeroarc® z izolacją FEP i może zostać wdrożona do seryjnej produkcji.

Integralną część recenzowanej pracy doktorskiej stanowi także obszerny Załącznik nr 1, zawierający zestawienie wykresów fazowych wyładowań niezupełnych (PRPD, ang. *Phase Resolved Partial Discharge*), które uzyskano w trakcie testowych badań laboratoryjnych każdej z analizowanych próbek typu „kabel-mufa-kabel”.

**Za najważniejsze w rozprawie uważam rozdziały: czwarty, piąty, szósty i siódmy, które zawierają wyniki autorskich badań doktoranta i stanowią ponad 50 % objętości pracy.**

### **3. Główne osiągnięcia rozprawy**

**Do najważniejszych osiągnięć naukowych doktoranta zaliczam:**

- wykonanie badań i analizy właściwości materiałów izolacyjnych w aktualnie stosowanych mufach kablowych, w szczególności w aspekcie ich kompatybilności i potencjalnego wykorzystania z kablami z izolacją FEP,

- przeprowadzenie przykładowych symulacji komputerowych rozkładu natężenia pola elektrycznego w projektowanej mufie kablowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych w oprogramowaniu Argos2D,
- opracowanie prototypu wysokotemperaturowej mufy kablowej SN, który może zostać wdrożony do seryjnej produkcji i być wykorzystany do łączenia kabli z izolacją fluoropolimerową,
- opracowanie procedury poprawnego montażu zaproponowanej konstrukcji wysokotemperaturowej mufy kablowej na kabla Zeroarc® z izolacją FEP,
- zbudowanie stanowisk pomiarowych i opracowanie procedur testowych dla badanych próbek kabli FEP oraz prototypów wykonanych muf kablowych, które dotyczyły m.in.: pomiarów WNZ, pomiarów napięcia przebicia, kontrolowanego starzenia termicznego, czy cyklicznych badań temperaturowych,
- realizację badań i ocenę wpływu długotrwałego starzenia wybranych materiałów izolacyjnych zastosowanych do wykonania prototypu mufy kablowej SN na generację WNZ z wykorzystaniem nieniszczących metod elektrycznych oraz radiograficznych,
- przeprowadzenie badań i analizy wpływu długotrwałego starzenia termoelektrycznego złącz „kabel FEP - mufa kablowa - kabel FEP” na morfologię izolacji i powłoki, jak również na wartość napięcia zapłonu oraz poziom generacji WNZ,
- dokonanie oceny wyników badań starzeniowych zaproponowanej konstrukcji mufy kablowej SN w odniesieniu do możliwości jej ciągłej pracy przez okres około 20 lat.

Doktorant w stopniu biegłym opanował tematykę rozprawy w warstwie nie tylko teoretycznej, ale przede wszystkim praktycznej, w oparciu o dobre rozeznanie problemów materiałowych, technologicznych i naukowych związanych z badaniami symulacyjnymi oraz licznymi procedurami pomiarowymi, m.in.: wytrzymałości mechanicznej, rezystancji zestykowej, wytrzymałości elektrycznej, czy wyładowań niezupełnych. W opinii recenzenta przyjęta przez autora teza rozprawy została udowodniona – opracowano i wykonano konstrukcję wysokotemperaturowej mufy kablowej SN dla kabla Zeroarc® z izolacją FEP firmy Habia Cable. Stwierdzam, że doktorant dysponuje wymaganym do prowadzenia badań naukowych zasobem wiedzy z obszaru elektrotechniki, w szczególności z zakresu materiałoznawstwa elektrotechnicznego oraz techniki wysokich napięć.

#### 4. Ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Podział treści rozprawy jest relatywnie logiczny i uporządkowany. Styl oraz poziom językowy jest ogólnie dość dobry – czasami w tekście można zidentyfikować wyrażenia potoczne i/lub nie do końca poprawne stylistycznie i logicznie sformułowane zdania, czy wypowiedzi autora. Szata graficzna generalnie nie budzi większych zastrzeżeń, niemniej jednak dla poprawy czytelności przekazywanych treści, zalecałbym na przyszłość powiększenie niektórych rysunków, w szczególności tych, które zawierają istotne detale lub zawierają analizowane w treści pracy wartości liczbowe (np.: rys. 6-7, 6-8, 6-9, 6-12, 6-15, 7-3, 7-7). Ujęcie graficzne rysunków, wykresów i fotografii uważam za wystarczające. Dobrze nawiązują one do treści pracy. Zjawiska



fizyczne, wywody, objaśnienia wzorów i wyników zostały przedstawione w sposób relatywnie jasny i czytelny. Sposób przekazywania treści jest zadowalający. Zagadnienia prezentowane w pracy tworzą merytoryczną spójność i nie wymagają gruntownych zmian. W opinii recenzenta dość dużym mankamentem pracy jest pewna „minimalistyczność” i „skrótowość”, która objawia się w sposobie przekazywania i omawiania treści rozważanych w poszczególnych rozdziałach rozprawy przez jej autora. W moim przekonaniu, rozwinięcie obecnej zawartości dysertacji o dodatkowe komentarze, czy wywody doktoranta, zdecydowanie polepszyłoby odbiór i zrozumienie uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań rezultatów. Wszystkie pozycje literaturowe zamieszczone w bibliografii mają swoje odniesienie w treści recenzowanej pracy. W pracach doktorskich spis treści z reguły realizuje się w zgodzie z chronologią alfabetyczną autorów cytowanych pozycji, natomiast w opiniowanej rozprawie przypisy zrealizowano w kolejności ich występowania w tekście. W pracy można także odnaleźć dość liczne błędy stylistyczne, literowe, edytorskie, czy niezbyt precyzyjne zwroty, bądź sformułowania, wśród których można m.in. wymienić (przedstawiono tylko wybrane przykłady):

1. str. 7 – jest: „Dg       Decygram”, winno: „dg       Decygram”;
2. dotyczy całej rozprawy doktorskiej – jeśli na końcu linii tekstu pojawia się jednoliterowy spójnik lub przyimek (tzw. sierota), typu a, i, u, w, itp. – zaleca się jego przeniesienie do następnego wiersza;
3. str. 12, czternasta linia od dołu – w zdaniu: „...o przekrojach przewodnika od 0,1 mm<sup>2</sup> do nawet 100 mm<sup>2</sup>.” winno być: „...o przekrojach przewodnika od 0,1 mm<sup>2</sup> do nawet 500 mm<sup>2</sup>.”;
4. dotyczy całej rozprawy doktorskiej – sugerowałbym wprowadzenie przynajmniej jednego wolnego akapitu przed nazwami poszczególnych podrozdziałów, gdyż w obecnej wersji pracy nazwy te się „gubią”;
5. str. 13, piąta linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „czy”: „... zastosowano materiały takie jak guma, czy materiały polimerowe [10, 11, 12].”;
6. dotyczy całej rozprawy doktorskiej – sugerowałbym wprowadzenie przynajmniej jednego wolnego akapitu po opisach poszczególnych rysunków oraz przed opisami tabel, gdyż w obecnej wersji pracy objaśnienia te „zlewają się” z tekstem rozprawy;
7. str. 18 i 19 – brak wielu dwukropków, kropek lub przecinków przy opisach z użyciem znaków wypunktowania;
8. str. 19, dwunasta linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „jak”: „... pracowano nad udoskonaleniem tego materiału, jak i nad badaniem jego właściwości elektromechanicznych w zastosowaniach kablowych.”;
9. str. 19, dziesiąta linia od dołu – brak przecinka i dwukropka w zdaniu: „... dobrze określono jego cechy elektryczne, takie jak: odporność dielektryczną, wytrzymałość na przebicie oraz zmiany tych parametrów po starzeniu.”;
10. str. 19, piąta linia od dołu – brak przecinka oraz dwukropka w zdaniu: „... badano takie zjawiska jak: elektrodrzewienie, drzewienie wodne, czy zmiany wytrzymałości elektrycznej po starzeniu...”;
11. str. 19, trzecia linia od dołu – literówka w słowie „rysunku” – jest: „...na rysunki 1-3...”, winno być: „...na rysunku 1-3...”;

12. str. 20, druga linia od góry – nieprecyzyjne sformułowane zdanie – jest: „*Najnowsze badania natomiast skupiają się na przyczynach usterek...*”, w opinii recenzenta winno być: „*Najnowsze badania natomiast skupiają się na identyfikacji przyczyn usterek...*”;
13. str. 20, ósma linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „czy”: „... *wysokich temperatur, czy w agresywnym otoczeniu.*”;
14. str. 20, szósta linia od dołu – nieprecyzyjne sformułowane zdanie – jest: „*Coraz częściej napotykamy na kombinację niekorzystnych parametrów środowiskowych, które wykluczają materiały polietylenowe, także z zawartościami napelnaczy, z zastosowań [10].*”, w opinii recenzenta winno być: „*Coraz częściej napotykamy na kombinację niekorzystnych parametrów środowiskowych, które wykluczają materiały polietylenowe, także z zawartościami napelnaczy, z wielu powszechnych zastosowań [10].*”;
15. str. 23, siódma linia od dołu – użycie błędnego wyrazu w zdaniu – jest: „*Analizując przedawnione powyżej dane ....*”, winno być: „*Analizując przedstawione powyżej dane...*”;
16. str. 23, czwarta linii od dołu – nieprecyzyjne sformułowane zdanie – jest: „*Najnowsze badania nad materiałem FEP skupiają się na jego odporności na starzenie oraz mechanizmach przebicia.*”, w opinii recenzenta winno być: „*Najnowsze badania nad materiałem FEP skupiają się na ocenie jego odporności na starzenie oraz identyfikacji mechanizmów jego przebicia.*”;
17. str. 24, siódma linia od dołu – użycie błędnego wyrazu w zdaniu – jest: „*Autorzy tej publikacji określili, że materiały fluoropolimerowe mają większą wartość napięcia...*”, winno być: „*Autorzy tej publikacji określili, że materiały fluoropolimerowe mają wyższą wartość napięcia...*”;
18. str. 27, czwarta linia do dołu – literówka w słowie „rura” – jest: „*Zewnętrzna rur ochrania...*”, winno być: „*Zewnętrzna rura ochrania...*”;
19. str. 30 – brak powołania się autora pracy na źródło literaturowe, z którego pobrano zamieszczone w rozprawie fotografie – na końcu opisu rys. 2-2 powinien być przypis;
20. str. 32 – brak powołania się autora pracy na źródło literaturowe, z którego pobrano zamieszczoną w rozprawie fotografię – na końcu opisu rys. 2-3 powinien być przypis;
21. str. 33 – brak wielu kropek lub przecinków przy opisach z użyciem znaków wypunktowania;
22. str. 34 – we wzorze 2.1 zastosowano indeksację poszczególnych zmiennych z użyciem czcionki kursywy, natomiast w ich dalszym opisie użyto czcionki prostej – indeksacja poszczególnych zmiennych w całej rozprawie winna być spójna i tożsama;
23. str. 35 – brak wielu kropek lub przecinków przy opisach z użyciem znaków wypunktowania;
24. str. 36, 16 linia od dołu i niżej – błędnie sformułowane zdania – np. jest: „*Trzecią warstwą występująca w mufie jest warstwa kontrolująca pole elektryczne na zakończeniu zimnokurcza....*”, w opinii recenzenta winno być: „*Trzecią warstwą występująca w mufie jest warstwa sterująca rozkładem pola elektrycznego na zakończeniu zimnokurcza.....*”;
25. str. 38, pierwsza linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „czy”: „... *doprowadzają podczas eksploatacji do przebić, czy zniszczenia mufy kablowej.*”;

26. str. 38, pierwsza linia od dołu – niepoparte faktami lub bibliografią zdanie: „*Autorzy licznych publikacji na przestrzeni lat określili najczęstsze przyczyny awarii muf...*” – autor cytuje w tym miejscu tylko jedną pozycję, a warto byłoby powołać się na przynajmniej kilka różnych artykułów;
27. str. 42 – brak kropek lub przecinków przy opisach z użyciem znaków wypunktowania;
28. str. 43, druga linia od dołu – błąd ortograficzny, jest: „*spowodowało by*”, winno: „*spowodowałyby*”;
29. dotyczy całej rozprawy doktorskiej – brak użycia znaku interpunkcyjnego przecinka przed partykułą „*czy*” w zdaniach podrzędnie złożonych lub przeciwstawnych;
30. str. 48 – we wzorze 3.1 zastosowano indeksację poszczególnych zmiennych z użyciem czcionki kursywy, natomiast w ich dalszym opisie użyto czcionki prostej – indeksacja poszczególnych zmiennych w całej rozprawie winna być spójna i tożsama;
31. str. 48, piąta linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „*co*”: „*... gdy szybkość ogrzewania przekracza szybkość chłodzenia, co może doprowadzić do rozkładu termicznego materiału.*”;
32. str. 49, wzór 3.2 – brak wyśrodkowania przedstawionej zależności matematycznej;
33. str. 52, piąta linia od góry – niepoparte faktami lub bibliografią zdanie: „*Znaczenie wyładowań niezupełnych na wytrzymałość i długość życia został opisany w licznych opracowaniach naukowych...*” – autor cytuje na końcu akapitu tylko jedną pozycję, a warto byłoby powołać się na przynajmniej kilka różnych artykułów;
34. str. 52, czwarta linia od dołu – użycie błędnego wyrazu w zdaniu – jest: „*Rysunek przedstawia układ...*”, winno być: „*Rysunek przedstawia układ...*”;
35. str. 52, trzecia linia od dołu – błędnie merytorycznie zdanie: „*Napięcie przepływa przez żyłę roboczą kabla (zacisk A), a ekran zewnętrzny jest uziemiony (zacisk B)*”.
36. str. 61, ósma linia od dołu – w zdaniu: „*Ze wszystkich przeprowadzonych badań na różnych próbkach, najlepsze właściwości*” przed przecinkiem znajduje się dodatkowa spacja;
37. str. 64, czwarta linia od góry – błędnie stylistycznie zdanie: „*Norma IEC 60502-4 [86] zakłada, że zacisk mechaniczny powinien wytrzymać 60 razy rozmiar przewodnika, czyli  $60 \cdot 16 \text{ mm}^2 = 960 \text{ N}$ .*”;
38. str. 64, siódma linia od góry – błędnie stylistycznie sformułowane zdanie – jest: „*Natomiast rysunek 4-7 przedstawia badania rezystancji połączenia.*”, w opinii recenzenta winno być: „*Natomiast rysunek 4-7 przedstawia widok ogólny stanowiska pomiarowego do badania rezystancji połączeń toru prądowego budowanej mufy.*”;
39. str. 69, druga linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „*jak*”: „*... izolacji FEP i izolacji zimnokurcza, jak przedstawiono na rysunku 4-14.*”;
40. str. 72, czwarta linia od dołu – brak kropki na końcu zdania: „*Schemat zastępczy stanowiska został przedstawiony na rysunku 5-2.*”;
41. str. 76, trzecia linia od dołu – użycie języka potocznego w zdaniu, jest: „*Natomiast ułożenie na płasko próbek na kratkach...*”, winno być: „*Natomiast ułożenie próbek w pozycji poziomej na kratkach...*”;

42. str. 80, rys. 5-12 – obcięty opis osi OY;
43. str. 80, trzecia linia do dołu – literówka w słowie „*dodatkowo*” – jest: „...*badanych próbek i obniżone je o dodatkowe...*”, winno być: „...*badanych próbek i obniżono je o dodatkowe...*”;
44. str. 90 – brak kropek lub przecinków przy opisach z użyciem znaków wypunktowania;
45. str. 107, czwarta linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „*ale*”: „*Co prawda znajdują się one w podobnych miejscach, ale poziom napięcia...*”;
46. str. 107, druga linia od dołu – użycie błędnego słowa – jest: „...*że wielkość delaminacji na przekłada się na...*”, winno: „...*że wielkość delaminacji nie przekłada się na...*”
47. str. 109, druga linia od dołu – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „*które*”: „... *wysoko energetycznych ładunków, które mogłyby doprowadzić do przebicia mufy*”;
48. str. 112, trzecia linia od dołu – początek zdania od małej litery – jest: „*jedyne co można stwierdzić...*”, winno: „*Jedyne co można stwierdzić...*”
49. str. 122, dziewiąta linia od dołu – brak dwóch przecinków w zdaniu: „*Różnica w wartości ładunku pozornego, jak i kształtu wyladowania, wynika z rozszerzalności cieplnej zimnokurcza.*”;
50. str. 124, szesnasta linia od góry – brak przecinka w zdaniu przed wyrazem „*jak*”: „... *że poziom napięcia zapłonu wyladowań niezupełnych, jak i napięcie przebicia jest...*”;
51. str. 124, pierwsza linia od dołu i w dalsze części tekstu – niefortunne i błędne użycie terminu „*stan zdrowia*” wraz z jego licznymi powtórzeniami, np. w zdaniu: „*Eksploatacyjne badania stanu zdrowia mufy i kabla, które byłyby wykonywane w temperaturze pracy systemu będą ukazywały prawdziwy stan zdrowia mufy*” – określenie stan zdrowia ma zastosowanie do organizmów żywych, a nie urządzeń, czy osprzętu kablowego. W tym przypadku zdecydowanie bardziej zasadnym byłoby użycie pojęcia „*ocena stanu technicznego*”.

**Pragnę zaznaczyć, że zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia stylistyczne oraz edytor-  
skie nie wpływają na ocenę merytoryczną zawartości opiniowanej rozprawy doktorskiej.**

## **5. Uwagi merytoryczne i pytania dyskusyjne**

1. Efektem końcowym i głównym celem zrealizowanych w ramach opiniowanej rozprawy doktorskiej prac naukowo-badawczych było opracowanie przez doktoranta koncepcji oraz prototypu wysokotemperaturowej mufy kablowej SN, który mógłby zostać wdrożony do seryjnej produkcji i być wykorzystany do łączenia kabli Zeroarc® z izolacją FEP. Czy w oparciu o uzyskane wyniki i propozycje konkretnego rozwiązania technologicznego, autor rozprawy dokonał zgłoszenia ochrony patentowej swojego rozwiązania konstrukcyjnego? Bardzo proszę o dodatkowy komentarz w tej kwestii.
2. Czy zaproponowana i opracowana przez doktoranta konstrukcja wysokotemperaturowej mufy kablowej do łączenia kabli Zeroarc® z izolacją FEP zostanie wdrożona do seryjnej produkcji przez firmę Habia Cable Sp. z o.o.? Jeśli tak, to w jakim czasookresie można się tego spodziewać? Czy przed ostatecznym wdrożeniem zaproponowanego przez autora

pracy rozwiązania technologicznego, koniecznym będzie przeprowadzenie jeszcze jakiś dodatkowych badań i prób testowych? Jeśli tak, to bardzo proszę o dodatkowy komentarz w tym aspekcie.

3. W podrozdziale 1.3 rozprawy, w tabeli 1-2 *Wady i zalety wybranych materiałów izolacyjnych*, doktorant wymienia jako jedną z kluczowych wad materiału FEP właściwości antyadhezyjne. Czy brak adhezji występujący w izolacji FEP może stanowić w przyszłości zagrożenie dla bezawaryjnej eksploatacji kabli SN opartych o ten dielektryk, w szczególności w zakresie długoterminowej pracy osprzętu kablowego, tj. muf i głowic? Czy zna Pan wyniki badań naukowych w tym aspekcie realizowanych w innych ośrodkach naukowo-badawczych lub firmach produkcyjnych? Być może posiada Pan w tym zakresie znacznie szerszą wiedzę teoretyczną i praktyczną, aniżeli ta przedstawiona w rozprawie. Bardzo proszę o Pana komentarz i rozwinięcie problematyki antyadhezyjności materiałów izolacyjnych bazujących na fluoropolimerach, w szczególności w zakresie projektowania i budowy dedykowanych kablom FEP muf i głowic SN.
4. Kable SN wykonane w technologii FEP charakteryzują się bardzo korzystnymi właściwościami fizyko-chemicznymi oraz dielektrycznymi, dzięki którym możliwe jest zasilanie urządzeń średniego napięcia eksploatowanych w wysokiej temperaturze, czy agresywnym chemicznie środowisku. Jednym z poważniejszych zagrożeń towarzyszących eksploatacji kabli z izolacją FEP jest emisja fluorowodoru, który uwalnia się do otoczenia podczas pożaru tego rodzaju kabli. Fluorowodór jest bardzo toksycznym i żrącym gazem, który powoduje m.in. uszkodzenie dróg oddechowych, skóry oraz oczu. Czy w Pana opinii istnieje w przyszłości potencjalne ryzyko zakazania produkcji i stosowania w Unii Europejskiej kabli z izolacją opartą o fluoropolimery, oczywiście ze względu na aspekty ochrony środowiska lub zdrowia i życia organizmów żywych?
5. W rozdziale 5.6 rozprawy przedstawiono układ pomiarowy do realizacji badań starzenia termoelektrycznego i cyklicznego, jak również krótko scharakteryzowano przyjętą przez autora metodykę badawczą. We fragmencie przedmiotowego opisu można m.in. przeczytać: *„Podczas pomiaru WNZ, napięcie zostało rozłączane, próbki były rozdzielane i badane osobno. Pomiar 5 próbek zajmował około 1 – 1,5 godziny. Przez cały czas trwania pomiaru WNZ podtrzymywana była wyznaczona temperatura w komorze grzewczej. Po wykonanych pomiarach WNZ, ponownie łączono kable równolegle i załączano napięcie testowe.”* Bardzo proszę o szczegółowe omówienie przez doktoranta zastosowanej procedury pomiarowej, gdyż w obecnej formie nie jest ona zbyt czytelna i zrozumiała. Interpretując powyższy urywek tekstu można wywnioskować, że pomiary WNZ próbek typu kabel-mufa-kabel były realizowane beznapięciowo, co najprawdopodobniej całkowicie mija się z prawdą i zaprezentowanymi w rozdziale 6. wynikami. Najprawdopodobniej autor przez pomyłkę zastosował w zacytowanym tekście „pewien skrót myślowy”, który wprowadza niejasności co do faktycznie zastosowanej metodologii pomiarowo-badawczej.
6. W rozdziale 6.2.1 pracy pn. *Analiza rentgenowska* przedstawiono przykładowe wyniki analizy zdjęć RTG badanych próbek zimnokurczy. We fragmencie tekstu rozprawy można przeczytać: *„Dzięki analizie można było określić czy zimnokurcz posiadał nieciągłości warstw, wtrąciny metaliczne, nadlania materiałów przy łączeniu warstw lub czy występuje delaminacja materiałowa pomiędzy warstwami.”* Bardzo proszę o komentarz doktoran-

ta dotyczący wstępowania wtrącin metalicznych w zinokurczu. Skąd w starannie przygotowanych i śródoperacyjnie weryfikowanych próbkach zimnokurczy mogłyby pojawić się wtrąciny metaliczne?

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną do recenzji rozprawę należy zaliczyć do grupy prac projektowo-eksperymentalnych, które są pracami wysoce czasochłonnymi. Ponadto wymagają one od badacza dużych umiejętności z różnego obszaru elektrotechniki, np. teorii pola elektromagnetycznego, materiałoznawstwa elektrotechnicznego, metrologii, a także znajomości zagadnień z zakresu techniki wysokich napięć. W opinii recenzenta doktorant posiadał umiejętność planowania eksperymentu naukowo-badawczego oraz rozwiązywania rzeczywistych problemów techniczno-inżynierskich. W bardzo dobrym stopniu doktorant opanowała także technologię przygotowania materiału badawczego i technicznego przeprowadzonych prób i testów na stworzonych stanowiskach laboratoryjnych. Wykazał się także dość dobrą umiejętnością szczegółowej oceny wyników otrzymanych badań. Doktorant wykazał, że ma niezbędne kwalifikacje do prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązał w sposób oryginalny zagadnienia naukowe będące tematem jego rozprawy.

Rozwiązanie problemu postawionego w pracy jest ciekawe nie tylko z naukowo-poznawczego punktu widzenia, lecz przede wszystkim z tego, iż zaprezentowane w pracy wyniki w postaci opracowanej koncepcji oraz prototypu wysokotemperaturowej mufy kablowej SN do łączenia kabli Zeroarc® z izolacją FEP mogą być w przyszłości wdrożone do seryjnej produkcji w firmie Habia Cable Sp. z o.o. Praca zawiera elementy nowości w sensie naukowym, stanowiące udokumentowany dorobek własny doktoranta.

**Stwierdzam, że opiniowana praca jest kompletna i nie wymaga zmian ani uzupełnień. W mojej opinii spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w stosownej ustawie. Wnioskuje o przyjęcie niniejszej dysertacji jako rozprawy doktorskiej. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie Pana mgr inż. Radosława Lewandowskiego do publicznej obrony przedłożonej pracy w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

  
.....  
*prof. dr hab. inż. Sebastian Borucki*