

dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. nz.

Kraków, 8 listopada 2023 roku

Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor: **mgr inż. Łukasz Woźniak**

Tytuł: **Wpływ parametrów taśm HTS 2G na ograniczanie prądu
w stanach przejściowych transformatorów nadprzewodnikowych**

Promotor: **dr hab. inż. Paweł Surdacki**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Leszek Jaroszyński**

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej z dnia 12.07.2023 w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Woźniaka i pisma tejże Rady o numerze RDN_AEiE_W_20120-24 z dnia 12.09.2023 r. podpisanego przez dr hab. M. Majkę – z-cę Przewodniczącego Rady.

1. Oświadczenia

Przyjmując na siebie obowiązki recenzenta oświadczam, że nie istnieją jakiegokolwiek okoliczności mogące wywołać wątpliwości co do jego bezstronności, a w szczególności:

1. nie jestem współautorem prac naukowych kandydata do stopnia doktora;
2. nie uczestniczyłem, ani nie uczestniczę wspólnie z kandydatem do stopnia doktora w zespołach badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych;
3. nie prowadziłem wspólnie z kandydatem do stopnia doktora prac naukowych w instytucjach naukowych;
4. nie sporządzałem recenzji w innych postępowaniach o awans naukowy kandydata do stopnia doktora oraz nie pełniłem w nich funkcji promotora albo promotora pomocniczego;
5. nie zachodzą inne okoliczności określone w art. 24 ustawy z dnia 14 czerwca 1960 r. - Kodeksu postępowania administracyjnego (t.j. Dz. U. z 2021 r. poz. 735, z późno zm.), które skutkowałyby niemożnością wykonania przedmiotu umowy.

2. Podstawowe dane o kandydacie do stopnia doktora

a) data uzyskania tytułu magistra oraz nazwa jednostki organizacyjnej, w której tytuł był nadany;

Tytuł magistra kandydat uzyskał w roku 2012 po ukończeniu studiów II stopnia (magisterskich) na Politechnice Warszawskiej, Wydział Elektryczny, kierunek Elektrotechnika, specjalność Elektroenergetyka. Tytuł pracy magisterskiej: „*Metody polepszania wskaźników jakości energii elektrycznej w sieciach SN i nN oraz badanie jakości energii elektrycznej na stacji SN/nN*” (promotor dr hab. inż. Stanisław Ziemiąnek, prof. Uczelni).

b) informacja, czy kandydat ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora, w tym - o ile wynika to z dokumentacji sprawy - informacja o przebiegu i zakończeniu:

Z dostarczonej dokumentacji wynika, że kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora (oświadczenie mgr Woźniaka z dnia 20.09.2016 roku).

c) przebieg pracy naukowo – zawodowej (miejsce pracy, zajmowane stanowisko);

Pracę zawodową kandydat podjął w 2011 roku i realizował w kilku jednostkach na różnych stanowiskach. Od roku 2015 do teraz jest głównym specjalistą ds. inżynierii, kierownikiem projektów, Enea

Wytwarzanie sp. Z o.o., Świerże Górne, Al. Józefa Zielińskiego 1, 26 – 900 Kozienice. Zakres obowiązków kandydata na tym stanowisku to: kierowanie projektami modernizacyjnymi w Elektrowni Kozienice i innych obiektach Enea Wytwarzanie (aktualnie realizowanych jest 25 takich projektów), przegląd innowacyjnych technologii dostępnych na rynku i wprowadzanie ich do opracowywanych zakresów prac modernizacyjnych, uczestniczenie w zespołach negocjacyjnych i przetargowych, planowanie i kosztorysowanie, zarządzanie zespołem projektowym, nadzorowanie i kontrola wykonanych prac modernizacyjnych, uczestniczenie w radach technicznych.

3. Informacje o ocenianej rozprawie doktorskiej

- a) tytułu rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora;

Wpływ parametrów taśm HTS 2G na ograniczanie prądu w stanach przejściowych transformatorów nadprzewodnikowych

Promotorem rozprawy jest prof. P. Surdacki, zaś promotorem pomocniczym dr L. Jaroszyński

- b) ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych;

Rozprawa doktorska przedstawiona do recenzji prezentuje analizę wpływu parametrów taśm nadprzewodzących HTS drugiej generacji na ograniczanie prądu w stanach przejściowych transformatorów nadprzewodnikowych (stany przejściowe w pracy transformatorów to wg autora: włączanie transformatora do sieci i zwarcie). Analizę taką doktorant przedstawił na podstawie wyników uzyskanych z opracowanych przez siebie modeli komputerowych. Na podstawie analizy zjawisk zachodzących w transformatorze nadprzewodnikowym kandydat zaproponował model komputerowy przygotowany na podstawie istniejącego fizycznego modelu transformatora małej mocy 10 kVA, a następnie zbudował taki model dla transformator dużej mocy 21 MVA.

Treść rozprawy autor podzielił na siedem rozdziałów: wstęp, dwa rozdziały wprowadzające, dwa zasadnicze rozdziały „autorskie” (są to rozdziały 4 i 5), wnioski i spis literatury. Całość pracy przedstawił na 116 stronach monografii. Załączony spis literatury liczy 106 pozycji, wśród których znajdujemy 14 pozycji, w których mgr Woźniak jest współautorem.

W rozdziale pierwszym sformułowany został cel rozprawy, jej teza oraz obszar badawczy, który dla zrealizowania celu kandydat sobie wyznaczył. Czytamy zatem: „**Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie modelu komputerowego transformatorów nadprzewodnikowych z wykorzystaniem dwóch rodzajów taśm HTS 2G w procesie ograniczania prądów w stanach przejściowych oraz przeprowadzenie ich weryfikacji.**

Teza rozprawy została sformułowana następująco: modele komputerowe stanów przejściowych transformatorów nadprzewodnikowych umożliwiają dobór taśmy HTS 2G zapewniający skuteczne ograniczanie prądów włączania i prądów zwarciovych.

Uzasadnieniem tak sformułowanej tezy – wg autora rozprawy – jest wzrastająca popularność formułowania i tworzenia modeli komputerowych, które wydają się być – na dzień dzisiejszy – jedyną metodą pozwalającą wirtualnie przetestować i zbadać różne urządzenia, w tym tak złożone jak transformator nadprzewodnikowy w zadanych warunkach pracy. Recenzent podziela ten punkt widzenia. Badania urządzenia rzeczywistego jest zwykle bardzo kosztowne. Zatem dobrze opracowany model i prowadzone symulacje pozwalają na właściwy dobór parametrów, które mogą posłużyć do budowy modelu fizycznego.

Dla osiągnięcia celu i dowiedzenia słuszności tezy, autor postawił przed sobą kilka zadań (zapisanych w rozdziale pierwszym dysertacji), a mianowicie:

1. zebranie i opracowanie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego właściwości materiałów taśm nawojowych stosowanych w transformatorach HTS,
2. opracowanie modelu komputerowego taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji ze stabilizatorem miedzanym i bez stabilizatora miedzianego,
3. opisanie stanów pracy transformatorów nadprzewodnikowych wraz z wyszczególnieniem parametrów elektrycznych i cieplnych uzwojeń nadprzewodnikowych transformatorów HTS ograniczających prąd w stanach przejściowych,



4. opracowanie modelu komputerowego transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA,
5. analizę stanów ustalonych i przejściowych opartą na komputerowym modelu transformatora nadprzewodnikowego w programie PSpice oraz porównanie otrzymanych wyników z danymi eksperymentalnymi,
6. wykonanie projektu obliczeniowego wraz z opracowaniem modelu komputerowego jednofazowego transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o mocy 21 MVA,
7. przeprowadzenie analizy stanów ustalonych i przejściowych transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o mocy 21 MVA.

Drugi rozdział rozprawy kandydat poświęcił opisowi materiałów nadprzewodnikowych i ich właściwości pod kątem ich użycia jako materiałów nawojowych w transformatorach nadprzewodnikowych. Znajomość tych parametrów jest konieczna do opisu matematycznego zjawisk zachodzących w taśmie nadprzewodnikowej. Model komputerowy taśmy nadprzewodnikowej został wykonany w oparciu o właściwości rzeczywistych materiałów.

W trzecim rozdziale została przedstawiona budowa transformatorów nadprzewodnikowych oraz omówiona zasada ich działania. Opisano także proces ograniczania prądów zwarciovych w transformatorze nadprzewodnikowym. Ponadto omówiono dwa najważniejsze prądowe stany nieustalone: włączanie transformatora do sieci oraz ruchowe zwarcie sieciowe.

Czwarty rozdział zawiera opis opracowanego przez autora komputerowego modelu transformatora nadprzewodnikowego. Został on wykonany na podstawie rezultatów badań rzeczywiście istniejącego transformatora nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA zbudowanego w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Porównaniu poddano wyniki stanów ustalonych (stan jałowy, stan zwarcia pomiarowego) oraz stanów nieustalonych (prąd włączania, zwarcie podczas pracy znamionowej).

W rozdziale piątym przedstawiony jest projekt obliczeniowy transformatora konwencjonalnego i transformatora nadprzewodnikowego wraz z rozbudowaniem wykonanego wcześniej zweryfikowanego modelu komputerowego. Autor porównał straty i sprawność transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o mocy 21 MVA. Zamodelował stany ustalone (stan jałowy, stan zwarcia pomiarowego) dla transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego. Przeprowadził analizę parametrów elektrycznych i cieplnych transformatora nadprzewodnikowego na ograniczanie prądów podczas stanów przejściowych transformatora nadprzewodnikowego o mocy 21 MVA.

Ostatni rozdział dysertacji to Podsumowanie i wnioski, w którym autor stwierdza, że cel rozprawy został zrealizowany i dowiódł słuszności postawionej tezy. Autor enumeratywnie wylicza zrealizowane w dysertacji cele cząstkowe (jest ich 9). W dysertacji zawarty jest też spis literatury obejmujący 106 pozycji (rozdział 7) i rozdział 8 zatytułowany „Załączniki” zawierający zestawienie wielkości używanych w trakcie obliczeń modelowych.

Wg recenzenta zaprezentowana struktura dysertacji jest spójna, logiczna i dobrze opisuje podjętą pracę badawczą także w aspekcie realizacji wspomnianych wyżej siedmiu celów cząstkowych.

Recenzowana dysertacja powstała w ośrodku, w którym tematyka aplikacji nadprzewodnictwa do różnych urządzeń elektrotechnicznych jest rozwijana od wielu lat. Istnieje zatem dobry klimat do kontynuowania tej tematyki także w aspekcie, który podjął doktorant. Przedstawiona dysertacja wnosi wartość dodaną do tematyki badawczej ośrodka, bowiem jej autor skupia się na opracowaniu modeli komputerowych transformatorów nadprzewodnikowych z wykorzystaniem różnych rodzajów taśm HTS 2G (konkretnie dwóch) w procesie ograniczania prądów w stanach przejściowych, a szczególną uwagę poświęcił zmianom parametrów elektrycznych i cieplnych w procesie ograniczania prądów w stanach przejściowych, do których zalicza: włączanie nieobciążonego transformatora HTS z uzwojeniami z taśmy nadprzewodnikowej 2G do sieci oraz zwarcia uzwojenia wtórnego podczas pracy znamionowej transformatora.

W świetle poczynionych uwag ogólnych stwierdzam, że podjęcie tematu przedstawionego w recenzowanej dysertacji: *Wpływ parametrów taśm HTS 2G na ograniczanie prądu w stanach przejściowych transformatorów nadprzewodnikowych* jest celowe i w pełni uzasadnione.



4. Uwagi merytoryczne

Transformatory są niezbędnym elementem systemu elektroenergetycznego w obszarze przesyłania i rozdziału energii elektrycznej. Zmieniają parametry energii elektrycznej na wielkości dostosowane do transmisji tejże energii w danym segmencie systemu. Nadprzewodnictwo z kolei jest zjawiskiem, które umożliwia – przynajmniej teoretycznie – bezstratne przekształcanie parametrów tej energii. Recenzowana dysertacja ulokowana jest w **dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne** (w chwili otwierania doktoratu była to dyscyplina **elektrotechnika**), na przecięciu dwóch obszarów takich jak: zjawisko transformowania parametrów energii elektrycznej i bezstratnego przewodzenia prądu. Przecięcie to tworzy specyficzny obszar nauki i techniki, który nazywa się **krioelektrotechniką**.

Transformatory są jedną z bardziej obiecujących aplikacji nadprzewodników. Najbardziej użyteczną własnością uzwojeń nadprzewodnikowych w transformatorach jest zdolność przewodzenia prądów o dużej gęstości przy bardzo małych stratach energetycznych.

Istotnym problemem badawczym i eksploatacyjnym transformatorów (zarówno w aspekcie projektowania, budowy jak i użytkowania) „klasycznych” ale także nadprzewodnikowych, jest analiza prądu włączenia transformatorów a także analiza prądów zwarciovych. Oba te stany w przypadku transformatorów z uzwojeniami miedzianymi (transformator „klasyczny”) są zjawiskami stosunkowo dobrze rozpoznanym, zarówno na drodze analizy teoretycznej, jak i badań eksperymentalnych na rzeczywistych jednostkach. W przypadku projektowania i eksploatacji transformatorów nadprzewodnikowych należy uwzględnić w analizie ich pracy specyfikę nadprzewodnictwa. Podstawowe zagadnienie związane jest z koniecznością utrzymania uzwojeń w stanie nadprzewodzenia. Utrata tego stanu może mieć miejsce, gdy natężenie prądu przewodzonego przez uzwojenie transformatora przekroczy wartość krytyczną dla nadprzewodnika lub uzwojenie nagrzej się do temperatury wyższej od krytycznej. Dojdzie do tego również, gdy pole magnetyczne, w jakim znajduje się uzwojenie, przekroczy wartość krytyczną dla nadprzewodnika. Konsekwencją utraty stanu nadprzewodzenia może być wzrost temperatury uzwojeń transformatora do wartości, przy której nastąpi ich termiczne uszkodzenie.

Za tłumienie prądu włączania transformatora do sieci jak i prądu zwarcia odpowiedzialna jest rezystancja uzwojeń transformatora. W stanie nadprzewodzenia rezystancja ta jest zerowa. Wzrasta ona gwałtownie, gdy uzwojenie przechodzi do stanu rezystywnego, co może mieć miejsce, gdy prąd włączania lub prąd zwarcia przekroczy wartość krytyczną dla nadprzewodnika. Podczas trwania fali tego prądu uzwojenie może wielokrotnie wychodzić ze stanu nadprzewodzenia i do niego powracać. Przekłada się to na zmianę innych parametrów pracy, w tym np. czasu zaniku prądu włączania transformatorów nadprzewodnikowych, w porównaniu z transformatorami konwencjonalnymi. Jak powiedziałem wcześniej, o zachowaniu uzwojeń nadprzewodzących w stanach przejściowych decydują parametry materiału (nadprzewodnika), z którego są one wykonane.

Zasadniczą częścią recenzowanej dysertacji było wyjaśnienie wpływu parametrów elektrycznych i cieplnych warstwowych taśm HTS 2G typu SF (bez stabilizatora) oraz SCS (z warstwą stabilizatora miedzianego) w procesie ograniczania prądów w stanach przejściowych.

Autor przedstawia w rozprawie komputerową analizę modeli transformatorów HTS ze szczególnym uwzględnieniem ich pracy w stanach przejściowych, wykorzystując w tym celu program PSpice.

W pierwszej „autorskiej” części dysertacji (jest to rozdział 4) przedstawił model komputerowy transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA, a następnie przeprowadził analizę stanów ustalonych i przejściowych opartą na komputerowym modelu transformatora nadprzewodnikowego w programie PSpice a także porównał otrzymane wyniki z danymi eksperymentalnymi, które dotyczą rzeczywistego modelu takiego urządzenia zbudowanego w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie Instytutu Elektrotechniki w Warszawie. Analiza porównawcza pozwoliła wysnuć wniosek o dobrej zgodności wyników symulacji i eksperymentalnych, co świadczy o właściwej konstrukcji modelu. Konstatacja ta była impulsem dla doktoranta do podjęcia prac nad wykonaniem projektu obliczeniowego (modelu komputerowego) jednofazowego transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o mocy 21 MVA. Taki model został przetestowany, uzyskano ciekawe rezultaty dotyczące zarówno stanów ustalonych i przejściowych transformatora konwencjonalnego i nadprzewodnikowego o takiej właśnie mocy.

Zdaniem recenzenta część dysertacji opisana w rozdziale 5 zasługuje na szczególną uwagę. Autor sam wymienia ten rozdział jako „autorski” i stwierdza, że opisane tam zagadnienia modelowania są



ważnym osiągnięciem: „*opracowanie modelu komputerowego transformatora HTS o mocy 21 MVA o uzwojeniach zbudowanych z taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji typu SCS 12050 (z warstwą stabilizatora miedzianego) i SF 12050 (bez stabilizatora) w środowisku programu PSpice na bazie zweryfikowanego modelu komputerowego transformatora HTS o mocy 10 kVA*”.

Doktorant opracował i przedstawił w tym rozdziale komputerowy model dwuuzwojeniowego transformatora nadprzewodnikowego HTS o mocy 21 MVA i napięciu 70/10,5 kV. Do konstrukcji uzwojeń transformatora zaproponował zastosowanie taśmy nadprzewodnikowej typu SCS 12050 (z warstwą stabilizatora miedzianego) oraz SF 12050 (bez stabilizatora). Model obwodowy taśm nadprzewodnikowych opracowany w środowisku programu PSpice uwzględnia potęgowe prawo Rhynera oraz opis obwodu magnetycznego wykorzystujący model histerezy magnetycznej Jilesa-Athertona poziomu drugiego. Właściwie zaprojektowany i zamodelowany transformator nadprzewodnikowy o odpowiednich parametrach elektrycznych i cieplnych może ograniczać prądy w stanach przejściowych. Spełniać zatem może z powodzeniem swoje przeznaczenie.

Autor zwraca uwagę na fakt, że ograniczanie prądów w stanach przejściowych transformatora HTS następuje głównie na skutek wzrostu rezystancji uzwojeń. Stwierdza ponadto, że można zaprojektować transformator nadprzewodnikowy o niskim poziomie reaktancji zwarcia. Mniejszą reaktancję zwarcia uzyskuje się m.in. poprzez zmniejszenie szczeliny powietrznej pomiędzy uzwojeniem pierwotnym i wtórnym. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu jako chłodziwa uzwojeń ciekłego azotu o dobrych właściwościach izolacyjnych. Tak zaprojektowany transformator charakteryzuje się także mniejszym magnetycznym strumieniem rozproszenia, co skutkuje w konsekwencji znacznie lepszą jakością energii elektrycznej dostarczanej do odbiorcy końcowego. Jest to zatem kolejna pozytywna cecha transformatorów nadprzewodnikowych.

Mgr inż. Ł. Woźniak stwierdza na podstawie uzyskanych rezultatów symulacji, że wyniki obliczeń prądów w stanach przejściowych które uzyskał w skonstruowanym przez siebie modelu komputerowym transformatora HTS 21 MVA 70/10,5 kV z uzwojeniami z taśm typu SF 12050 bez stabilizatora miedzianego są bardzo korzystne. Impulsy prądów jednokierunkowych transformatora HTS z uzwojeniami wykonanymi z taśmy SF 12050 bez stabilizatora miedzianego są wielokrotnie mniejsze niż dla uzwojeń wykonanych z taśmy z warstwą stabilizatora miedzianego SCS 12050. Dla uzwojeń wykonanych z taśmy SF 12050 czas zanikania prądu włączania jest krótszy niż dla taśmy SCS 12050. Mniejsze wartości impulsów prądów włączania oraz krótszy czas ich zanikania powodują również mniejsze przyrosty temperatury uzwojenia pierwotnego. Udarowy prąd zwarcia w uzwojeniu wtórnym, jak i pierwotnym wykonanym z taśmy SF 12050 jest znacząco mniejszy niż w przypadku zastosowania taśmy SCS 12050.

Ciekawą konstatację – w aspekcie interpretacji otrzymanych rezultatów – autor zapodaje jednak w Podsumowaniu (str. 102, w.16 g): „*zaproponowany model transformatora jest idealizowany i w rzeczywistości wykonanie uzwojeń z taśmy SF 12050 nie jest zasadne, gdyż przejście taśmy ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego powoduje degradację taśmy i pogorszenie jej parametrów elektrycznych i cieplnych. W przypadku zwarcia na wyjściu transformatora tylko uzwojenie wtórne wykonane z taśmy bez stabilizatora miedzianego SF 12050 przechodzi do stanu rezystywnego, natomiast uzwojenie pierwotne SF 12050 przechodzi do stanu rezystywnego tylko częściowo (nie w całej objętości). Brak pełnego przejścia uzwojenia pierwotnego do stanu rezystywnego wyklucza możliwość wykonania uzwojeń transformatora HTS z wykorzystaniem taśmy bez stabilizatora miedzianego. Wykonana analiza modelu komputerowego transformatora HTS 21 MVA 70/10,5 kV nasuwa wniosek, że jedynie taśma ze stabilizatorem miedzianym SCS 12050 jest odpowiednia do konstrukcji uzwojeń transformatora HTS. Prezentowane rezultaty badań symulacyjnych prowadzonych przez doktoranta przeczą jednak takiemu wnioskowi (wg recenzenta). Jak zatem uzasadnić ostateczny wniosek z rezultatów prezentowanych w rozdziale 5 dysertacji, który brzmi: „*Transformator nadprzewodnikowy musi jednak zostać zabezpieczony przed uszkodzeniami termicznymi i awariami, które występują podczas stanów przejściowych. Do zabezpieczenia transformatorów nadprzewodnikowych należy zastosować wyłączniki, które są w stanie wykryć i wyłączyć zwarcie w czasie krótszym niż 100 ms*”.*

5. Uwagi dyskusyjne, krytyczne i komentarze do rozprawy

Podczas lektury dysertacji autorstwa mgr. inż. Ł. Woźniaka, stwierdziłem kilka problemów, które z punktu widzenia recenzenta, nie zostały w dostatecznym stopniu przeanalizowane w przedstawionym opracowaniu. Poniżej sformułowane przeze mnie uwagi nie obniżają jednoznacznie pozytywnej opinii o



wykonanej pracy i jej rezultatach, jednakże – w zadeklarowanej przez autora chęci kontynuowania pracy badawczej w zarysowanym obszarze – mogą być przydatne.

1. Autor koncentruje swoje naukowe działania na modelowaniu procesów transformacji parametrów energii elektrycznej przy pomocy transformatorów nadprzewodnikowych, a więc urządzeniach, które na skalę „przemysłową” nie znalazły – jak dotąd – powszechnego zastosowania. Z tego punktu widzenia, omawiana praca jest oceniona przez recenzenta pozytywnie, jako wnosząca „nową perspektywę” w tym obszarze nauki i techniki. Pytanie jednak do autora brzmi: dlaczego uczynił przedmiotem swoich dociekań naukowych modelowanie „obwodowe” a nie „polowe”? Czy jest to kwestia doświadczeń zawodowych (np. dobrej znajomości programu PSpice, programu dość „starego”: pierwotna wersja programu to lata siedemdziesiąte ubiegłego wieku), czy też przemysłanych idei modelowania obwodowego zjawisk elektrycznych zachodzących w procesie transformacji parametrów i „ucieczki” od wielu znanych powszechnie problemów polowych (np. strumień rozproszenia, magnesowanie rdzenia transformatora, zależności temperaturowych rdzenia ferromagnetycznego)? Na stronie 26 monografii (w. 4 d) znajdujemy jednozdaniowe uzasadnienie: *„Do wykonania modelu wykorzystano modelowanie obwodowe w programie PSpice, ponieważ modelowanie polowe metodą elementów skończonych FEM (Finite Element Method) charakteryzuje się wielokrotnie większą złożonością”*. Stąd pytanie recenzenta wydaje się zasadne. A co z dokładnością modelowania (odwzorowania) rzeczywistych procesów obu metod? Czy autor zastanawiał się nad takim problemem?
2. Inna kwestia, która wzbudza zainteresowanie recenzenta, a która nie jest zauważona w dysertacji to problem modelowania magnetowodu transformatora, a w szczególności:
 - a) autor nie porusza kwestii pierwotnej krzywej magnesowania rdzenia magnetycznego. Czy może ona decydować o zachowaniu się rdzenia w trakcie przepływu prądu włączania transformatora i zwarcia, czy ważna jest tylko pętla histerezy materiału magnetowodu (zamodelowana w programie PSpice stosownym modułem)?
 - b) wg recenzenta istotny jest też wpływ temperatury na właściwości magnetyczne rdzenia. Potwierdzeniem tej konstatacji jest cenna uwaga doktoranta na str. 36 dysertacji: *„rdzeń transformatora pracuje w temperaturze otoczenia”*. Czy jednak we wszystkich konstrukcjach transformatorów – zwłaszcza dla konstrukcji o znaczących parametrach (np. wielu MVA?) taka konstrukcja jest realna? Jeśli istnieją konstrukcje transformatorów, w których rdzeń znajduje się w temperaturze innej niż temperatura „otoczenia”, jak wówczas wygląda zależność właściwości magnetycznych rdzenia od temperatury. Mam na myśli uwagę znajdującą się na str. 55, w której autor odnosi się do różnicy w rezultatach modelowych i rzeczywistych spowodowanych „wyciekaniem” ciekłego azotu do konstrukcji transformatora w jednej z serii eksperymentów.
 - c) w związku z powyższą uwagą nasuwa się pytanie: czy doktorant uczestniczył osobiście w budowie i badaniach transformatora rzeczywistego, czy tylko korzystał z rezultatów badań prowadzonych przez inny zespół badawczy?
3. Kolejny problem zauważony przez recenzenta w dysertacji, to kwestia „propagacji strefy normalnej” w nadprzewodniku. W modelu prezentowanym w dysertacji nie znajduje on dostatecznej uwagi. Rozumiem, że nie było to głównym przedmiotem realizowanej pracy naukowej. Jednak według wiedzy recenzenta, rozchodzenie się strefy rezystywnej w nadprzewodniku 2G i uzwojeniu nadprzewodzącym zrealizowanym z tego nadprzewodnika trwa określony czas. Wpływa zatem także na czas zadziałania zabezpieczeń transformatora. Jest to zjawisko bardzo złożone, którego analiza z pewnością wykracza poza ramy dysertacji, założonych przez autora. Jestem jednak przekonany, że chociażby krótka wzmianka dotycząca tego zagadnienia (tj. propagacji strefy normalnej w uzwojeniu wtórnym transformatora) powinna się znaleźć. Jak ten problem zamodelować w programie obwodowym” PSpace – jest kwestią trudną i do dyskusji, tym niemniej ważną. Świadczyłoby to o tym, że autor ma świadomość istoty i złożoności problemu i konieczności holistycznego podejścia do problemu. Zamiast tego, mamy tylko wzmiankę o tym, że transformator należy zabezpieczyć: *„transformator nadprzewodnikowy musi jednak zostać zabezpieczony przed uszkodzeniami termicznymi i awariami, które występują podczas stanów przejściowych. Do zabezpieczenia transformatorów nadprzewodnikowych należy zastosować wyłączniki, które są w stanie wykryć i wyłączyć zwarcie w czasie krótszym niż 100 ms.”* (str. 102, w. 15 d). Skąd ta wartość czasu zadziałania zabezpieczenia transformatora bez pogłębionej analizy działania transformatora a zwłaszcza przejścia uzwojenia wtórnego w stan rezystywny? Jakiego rodzaju zabezpieczenia autor ma na myśli? Recenzent spotkał się w literaturze przedmiot ze stwierdzeniem: *„Dla taśm nadprzewodnikowych*




drugiej generacji, o dużej wartości pojemności cieplnej w temperaturach roboczych, strefa rezystywna rozchodzi się bardzo powoli, lub nawet nie rozprzestrzenia się" [M. Majka: Ograniczenia w budowie nadprzewodnikowych ograniczników dużych prądów zwarciovych]. Proszę o krótkie ustosunkowanie się do tej kwestii. Proszę również o krótką informację, czy istnieje różnica w mechanizmie rozchodzenia się strefy rezystancyjnej w nadprzewodnikach nisko- i wysokotemperaturowych.

4. W swojej dysertacji autor nie wspomina o ważnym aspekcie jakim jest problem sił dynamicznych działających na uzwojenie transformatora w stanach dynamicznych. Siły elektrodynamiczne pojawiające się przy prądzie włączania a także prądach zwarcia mogą przyjmować znaczne wartości (duże gęstości prądu, silne pole magnetyczne) i powodować uszkodzenia izolacji uzwojeń i ich konstrukcji mocującej oraz uszkodzenia przełączników uzwojeń. W aspekcie praktycznej konstrukcji transformatorów nadprzewodnikowych ten problem ma także istotne znaczenie praktyczne. Mam na myśli analizowany przez doktoranta model transformatora o mocy 21 MVA.
5. W swojej dysertacji autor wspomina o równoległym połączeniu taśm nadprzewodnikowych. Wiadomo, że zwiększając liczbę równolegle połączonych taśm nadprzewodnikowych zwiększamy prąd znamionowy uzwojeń. Nie kwestionując tej oczywistej prawdy, nasuwa się jednak pytanie: połączenie równoległe taśm w ograniczniku zmniejsza jego rezystancję, a więc podstawowy atut w ograniczaniu prądu zwarcia. Jak autor wyjaśni tę sprzeczność?
6. Jak autor uzasadni wybór parametrów „dużego” transformatora o mocy 21 MVA i napięciu 70/10,5kV? Czy jednostki o takich parametrach istnieją w systemie elektroenergetycznym realnie, czy są to parametry „przypadkowo” dobrane przez doktoranta? Nasuwa się pytanie o „problemie skali”: transformator o mocy 21 MVA jest ok. dwustu krotnie większą jednostką w stosunku do transformatora 10 kVA (który istnieje realnie i był przedmiotem modelowania). Zatem czy nie należy w modelowaniu tak dużej jednostki uwzględnić innych zjawisk, które mogą tu wystąpić (np. wspomniane wcześniej siły dynamiczne, rozprzestrzenianie się strefy normalnej) ? Kolejne pytanie do autora (pytanie hipotetyczne): gdyby autor dysertacji był decydem formalnym i dysponował stosownymi środkami, czy podjąłby decyzję o wprowadzeniu do systemu elektroenergetycznego transformatora nadprzewodnikowego na dowolnym poziomie napięciowym i dowolnej mocy?
7. Praca jest edytorsko opracowana poprawnie, choć np. opisy wykresów (skale, legendy) w kilku przypadkach są mało czytelne. Na stronach 56 i 57 pomyślono numerację rysunków. Zdarzają się także (stosunkowo rzadko) usterki językowe (stylistyczne).

8. Konkluzja

Reasumując, stwierdzam jako recenzent przedstawionej mi do oceny pracy, że:

1. doktorant podjął temat o istotnym znaczeniu teoretycznym i praktycznym, zawierający trudne matematycznie (w sensie modelowania złożonych procesów) zadanie badawcze,
2. stworzył modele numeryczne pozwalające określić parametry pracy transformatorów nadprzewodnikowych w specyficznych stanach ich pracy: włączania do pracy w systemie elektroenergetycznym i w stanie zwarcia. Zaprezentowane w dysertacji modele umożliwiają symulację zjawisk zachodzących w tego typu transformatorze. Uzyskane wyniki analizy stanowią wkład w badanie wpływu parametrów elektrycznych i cieplnych taśm HTS 2G (rezystywność, pojemność i przewodność cieplną oraz prąd i temperaturę krytyczną), na skuteczność ograniczania prądów w stanach awaryjnych transformatorów nadprzewodnikowych. Taśmy tej generacji są aktualnie podstawowymi materiałami do zastosowań praktycznych.
3. Oceniana dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie problemu modelowania złożonych zjawisk zachodzących w transformatorze nadprzewodnikowym. Mimo iż użyty program modelowania w swojej pierwotnej wersji liczy już sporo lat, to jest w pełni przydatny do modelowania takich współczesnych urządzeń jakimi są transformatory nadprzewodnikowe. Opracowane przez doktoranta modele mogą – zdaniem recenzenta – być przydatne przy budowie modeli rzeczywistych.
4. Cel rozprawy jest jasno sformułowany, teza pracy – choć ogólnie podana – jest postawiona właściwie. Recenzent – jak zaznaczył wcześniej – zgadza się w pełni z tak sformułowaną tezą.
5. Zastosowane piśmiennictwo w rozprawie jest właściwe, dobór literatury prawidłowy. Recenzent nie wnosi zasadniczych zastrzeżeń. Pewną uwagę wzbudza przywołanie publikacji z lat 60-tych ubiegłego wieku odnośnie funkcjonowania transformatorów np. [28, 29]. Recenzent rozumie, że dotyczy to przywołanie znanych ogólnie podstaw działania transformatorów.



6. Zastosowana metoda badawcza jest – w aspekcie celu i tezy dysertacji – właściwa. Autor jest, jak wynika z przedstawionych rezultatów – dobrym znawcą programu PSpice i posługuje się tym programem swobodnie.
7. Wyniki uzyskane w rezultacie modelowania złożonych zjawisk występujących w transformatorze nadprzewodnikowym dużej mocy (21 MVA) są właściwie zinterpretowane i prowadzą do jednoznacznych wniosków odnośnie stosowania jednych z dwóch badanych taśm nadprzewodnikowych.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska autorstwa mgr. Ł. Woźniaka: *Wpływ parametrów taśm HTS 2G na ograniczanie prądu w stanach przejściowych transformatorów nadprzewodnikowych* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu, który doktorant obrał za cel swojej działalności naukowej. Prezentowana metoda modelowania i jej rezultaty mogą znaleźć praktyczne zastosowanie przy budowie rzeczywistych obiektów i świadczą o dużej wiedzy ogólnej jak i wiedzy pogłębionej (praktycznej) którą posiadał doktorant w trakcie realizowania rozprawy (modelowanie w konkretnym programie). Liczba przywołanych publikacji, w których współautorem jest mgr inż. Ł. Woźniak świadczy o umiejętności pracy naukowej zarówno indywidualnej jak i zespołowej.

Wymienione pozytywy recenzji upoważniają mnie – jako recenzenta dysertacji – do stwierdzenia, że spełnia ona wymagania określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r.: *”Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki”*. Zakres pracy zawartej w dysertacji świadczy bowiem o tym, że wiedza nabyta przez doktoranta jest wystarczająca do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz potwierdza umiejętność prowadzenia pracy naukowej przez doktoranta (zarówno w aspekcie pracy indywidualnej jak i zespołowej). Oceniam dostarczoną mi do recenzji dysertacji jednoznacznie **POZYTYWNIE**.

Biorąc pod uwagę powyższe wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej o dalsze procedowanie przewodu doktorskiego mgr inż. Ł. Woźniaka i dopuszczenie Go do publicznej „obrony” doktoratu.

Dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. uczelni

