

Streszczenie

Tytuł: Badania doświadczalne i numeryczne uzwajania cewek nadprzewodnikowych wykonanych z przewodu wielożyłowego Nb₃Sn typu Rutherford

Autor: mgr inż. Dariusz Pulikowski

Promotor: dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. ZUT

Praca doktorska została wykonana w ramach programu CERN Doctoral Student oraz badań Future Circular Collider.

Projekt High Luminosity-LHC (HL-LHC) oraz badania Future Circular Collider (FCC) wymagają osiągnięcia wyższego pola magnetycznego niż to generowane przez magnesy aktualnie zainstalowane w Wielkim Zderzaczu Hadronów (ang. Large Hadron Collider, LHC). Aby spełnić te założenia nowe dwu- oraz czterobiegunowe magnesy zostały zaprojektowane z wykorzystaniem związku międzymetalicznego niobu z cyną. Ze względu na kruchość związku Nb₃Sn, nawinięcie cewki z wykorzystaniem tego nadprzewodnika wymaga złożonej technologii cieplno-mechanicznej, zwanej wind-and-react. Technika ta polega na uzwajaniu cewki przy użyciu plastycznego przewodu zawierającego substraty chemiczne (niob oraz cynę) w stabilizującej macierzy miedzianej. Następnie cewka jest poddawana obróbce cieplnej w celu uzyskania nadprzewodnika.

Przewód wykorzystywany w produkcji wspomnianych cewek składa się z 40 żył o średnicy do 1 mm. Przewód typu Rutherford, o przekroju poprzecznym w kształcie trapezu, został zoptymalizowany w celu uzyskania spójnego przekroju cewki typu cos- θ . Z tego powodu uzwajany przewód jest poddawany gięciu o małym promieniu w szczególności na krańcach cewki, co prowadzi do niestabilności (deformacji) poszczególnych żył. Te niechciane deformacje wpływają na jakość wynikowej geometrii cewki oraz jej wydajność elektromagnetyczną. Podczas gdy manualna korekcja przewodu może być akceptowalna w fazie prototypowania czy produkcji jednostkowej, w przypadku produkcji wielkoseryjnej (dla przykładu w projekcie FCC) jest to niedopuszczalne.

Głównym celem rozprawy jest opracowanie procedury ilościowej oceny zdolności przewodu typu Rutherford do nawijania cewek nadprzewodnikowych. Aby uniknąć ingerencji w trwający proces produkcji cewek, badania eksperymentalne wymagają zaprojektowania specjalnych narzędzi umożliwiających uzwajanie reprezentatywnych próbek. Dzięki stanowisku testowemu złożona kinematyka maszyny do uzwajania została uproszczona. Uzwarzane próbki cechują się jednakowym rodzajem deformacji jak te zaobserwowane podczas produkcji. W celu przeprowadzenia ilościowej oceny deformacji kluczowe było zdefiniowanie adekwatnej metody pomiarowej. W tym celu zaprojektowane zostało optyczne urządzenie pomiarowe pozwalające na dokonanie inspekcji próbki uzwojenia.

Równolegle do przeprowadzanych eksperymentów, zrealizowana została numeryczna symulacja procesu uzwajania przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES) oraz analiza geometrii przewodu z wykorzystaniem absorpcji rentgenowskiej. Definicja danych materiałowych została poprzedzona badaniami wytrzymałościowymi żył Nb₃Sn. Pomimo

uproszczeń geometrycznych, przeprowadzona symulacja umożliwia wygenerowanie funkcji odkształcenia przewodu porównywalnych z tymi zaobserwowanymi w badaniach eksperymentalnych.

Dwie warstwy izolacji przewodu Nb_3Sn , złożone z włókna szklanego typu S-2 oraz miki, utrudniają bezpośrednią obserwację zachowania żył podczas uzwajania. Dlatego też przeprowadzono badanie z wykorzystaniem techniki aktywnej termografii, aby zdefiniować pozycję poszczególnych żył bez usuwania warstw zewnętrznych.

Należy podkreślić, iż analiza deformacji opisana w tej pracy ma na celu zdefiniowanie podstaw umożliwiających polepszenie jakości oraz powtarzalności geometrii produkowanych cewek nadprzewodnikowych. Zaproponowano potencjalne ulepszenia procesu, takie jak rozszerzona kontrola jakości geometrii podczas uzwajania oraz utwardzania czy rozbudowa kinematyki maszyny do uzwajania.

Szczecin, 27.03.2018



Dariusz Pulikowski

Abstract

Title: Experimental and numerical investigation of the winding process of superconducting coils made of multi-strand Rutherford-type Nb₃Sn cable

Author: M.Sc. Eng. Dariusz Pulikowski

Supervisor: dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. ZUT

The doctoral thesis has been carried out and supported by the CERN Doctoral Student Program in the framework of Future Circular Collider study.

The High Luminosity-LHC (HL-LHC) project and the Future Circular Collider study (FCC) require higher magnetic fields than provided by the magnets presently installed in the Large Hadron Collider (LHC). In order to fulfill this requirement new dipole and quadrupole magnets are designed based on Nb₃Sn superconductor. Due to the brittleness of Nb₃Sn compound, the cable is wound into a coil in its pristine state. Subsequently, after the coil winding process a heat treatment cycle is carried out in order to form the superconducting intermetallic phases. This production sequence is also called wind-and-react technique.

The cable used to produce these coils consists of 40-strands with a diameter of up to 1 mm. This Rutherford cable with its trapezoidal cross section was optimized to allow a tight azimuthal compaction in a cos- θ coil type. Due to the compact coil design the cable is subjected to a small bending radius in the coil-end regions, which can lead to mechanical instabilities (deformations) of the individual strands. These unwanted strand deformations can impact overall geometrical quality and electromagnetic performance of the coil. Manual corrections of such deformations might be acceptable for prototyping phases or small series production. However it is crucial to develop methods to minimize these phenomena especially in view of large series productions like foreseen for the production of the FCC magnet system.

This thesis is therefore aiming to develop methods to define, quantify and compensate the observed strand deformations based on numerical computations and experimental campaigns. The experimental campaigns will require to develop a special testing machine and winding specimens, since one requirement is not to interfere ongoing series production. The ongoing winding process for prototype and series coil production was mainly of scientific input regarding the observed mechanical instabilities. It will be shown that the complex winding kinematics can be in a first iteration reduced to single Degree Of Freedom (DOF) on a small winding setup, which will allow to reproduce the observed cable deformation. This setup is used to carry out test campaigns with different Rutherford cables, which allow good comparison of winding performance of various cable designs. In order to quantify the observed deformation it is crucial to define an adequate measurement routine. This is addressed by the development of an optical scanning device, which allows to perform the metrological inspection of the winding samples.

In parallel to these experimental campaigns numerical computations and X-ray absorption tomograms are carried out aiming to support the theoretical input in understanding the winding deformations. Mechanical tests improve the material definition for the numerical model will be

carried out. The multi-body model will allow to generate deformation functions similar to the ones observed on the full-size winding machine and 1 DOF winding specimen.

In addition, it is shown that the Nb₃Sn cable insulation layers deteriorate the direct observation of the strand deformation. Therefore a non-destructive inspection method will be examined aiming to determine the strand location underneath those layers.

It is important to underline that the analysis and contribution described in this thesis intends to provide the basis allowing to improve the quality and repeatability of obtained coil geometry. A potential further development is suggested that includes an enhanced monitoring of the coil geometry and development of winding machine kinematics, which can be applied for a future winding process.

Szczecin, 27.03.2018



Dariusz Pulikowski

Gliwice 07.05.2018r

dr hab. inż. Sławomir Duda, prof. PŚ
Instytut Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska w Gliwicach

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Dariusza Pulikowskiego

pod tytułem:

**„Badania doświadczalne i numeryczne uzwajania cewek
nadprzewodnikowych wykonanych z przewodu wielożyłowego Nb₃Sn typu
Rutherford”**

podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie dr. hab. inż. Mirosława Pajora prof. ZUT nr L.dz. WIMiM/74/2018 z dnia 28.03.2018 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Technologia magnesów nadprzewodnikowych rozwijana aktualnie w największym na świecie akceleratorze cząstek w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN bazuje na stopie niobu i tytanu. Postęp w dziedzinie inżynierii materiałowej oraz technologii produkcji magnesów umożliwił zbliżenie się do granicy wydajnego wykorzystania nadprzewodnictwa tego związku, a co za tym idzie, do maksymalnego generowanego pola magnetycznego. Rozpoczęte zostały badania mające na celu osiągnięcie wyższego pola magnetycznego z wykorzystaniem związku międzymetalicznego niobu z cyną. Badania te są wpisane w projekt High Luminosity-LHC oraz badania Future Circular Collider, będące częścią europejskiej strategii rozwoju fizyki wysokich energii. Nawinięcie cewki przy użyciu tego nadprzewodnika wymaga zastosowania technologii cieplno-mechanicznej zwanej wind-and-react. Technika ta ma na celu uniknięcie przerwania ciągłości kruchego związku Nb₃Sn podczas uzwajania, dzięki zastosowaniu

plastycznego przewodu, który zawiera substraty chemiczne w stabilizującej macierzy miedzianej. Po uzwajaniu cewka poddawana jest obróbce termicznej w 650°C w celu uzyskania nadprzewodnika.

Zdaniem Autora podstawowym problemem, jaki ujawnia się podczas uzwajania prototypowych cewek dwu- oraz czterobiegunowych z wykorzystaniem nadprzewodnika Nb_3Sn , jest stosunkowo duża deformacja przewodu oraz jego znaczne odchylenie od pozycji nominalnej. Brak precyzji w pozycjonowaniu kolejnych warstw przewodu w trakcie nawijania cewki wpływa niekorzystnie na kolejne etapy produkcji oraz jakość pola magnetycznego. Nieprzewidziana deformacja cewki może w najgorszym wypadku być powodem zniszczenia przewodu podczas procesu składania poszczególnych części magnesu, spowodowanego pękaniem filamentu.

W recenzowanej rozprawie podjęto aktualny i ważny, z praktycznego punktu widzenia, problem opracowania stosownego narzędzia (urządzenie badawcze i pomiarowe, aparat matematyczny analizujący otrzymane wyniki z pomiarów) umożliwiającego ilościową ocenę własności nawojowych przewodu typu Rutherford wykorzystywanego do nawijania cewek nadprzewodnikowych.

Ze względu na brak w literaturze światowej wyników badań o podobnym charakterze podjęta przez Autora próba zaproponowania własnych rozwiązań jest zatem przejawem dużej odwagi, dowodzi dobrego rozeznania problematyki i odpowiedniego przygotowania do badań.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że wybrany temat pracy doktorskiej jest aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn”.

2. Przegląd treści pracy

Opiniowana praca doktorska jest napisana w języku angielskim. Liczy 153 strony i składa się z dziewięciu rozdziałów, w tym zawiera spis literatury, który składa się z 69 anglojęzycznych pozycji literaturowych. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: introduction (wstęp), superconducting coil winding (uzwajanie cewek nadprzewodnikowych), research questions and scope of work (cel i tezę pracy) oraz sześć

rozdziałów merytorycznych zakończonych podsumowaniem, wnioskami końcowymi i omówieniem perspektyw dalszych badań.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor opisuje infrastrukturę badawczą Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych oraz realizowane tam projekty i badania. Przedstawiono zjawisko nadprzewodnictwa, charakterystykę przewodu typu Rutherford, opis elementów złożenia magnesu dwu- oraz czterobiegunowego oraz proces projektowania i parametry geometrii cewki.

W następnym rozdziale Autor, na podstawie doświadczenia oraz dostępnych procedur, zawarł szczegółowy opis procesu uzwajania cewek nadprzewodnikowych. Kinematyka maszyny do uzwajania została opisana z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga. W tym rozdziale Autor zawarł definicję oraz wizualizacje charakterystycznych deformacji przewodu typu Rutherford.

W rozdziale trzecim Autor przedstawia cele i zakres pracy. Za zasadniczy cel pracy Autor uznaje opracowanie odpowiedniej metodologii badań eksperymentalnych służących do oszacowania jakości procesu nawijania cewki z przewodu typu Rutherford wynikającej z różnych jego form deformacji powstających w trakcie tego procesu. Przyjęte cele i zakres pracy nie budzą zastrzeżeń i są adekwatne do rozwiązywanych w pracy problemów naukowych.

W kolejnym, czwartym, rozdziale rozprawy Autor prezentuje wyniki modelowania uproszczonego procesu uzwajania cewki przewodem typu Rutherford przy użyciu metody elementów skończonych. Przedstawiony model charakteryzuje się znacznymi uproszczeniami w odniesieniu do układu rzeczywistego. Na podstawie przeprowadzonych symulacji Autor ukazuje mechanizm powstawania deformacji w analizowanym przewodzie.

W rozdziale piątym Autor zaprezentował trzy odrębne technologie umożliwiające inspekcję geometrii badanej próbki. W przypadku analizy techniką aktywnej termografii Autor badał możliwość lokalizacji pojedynczych wiązek przewodu znajdujących się pod dwiema warstwami izolacji z miki i z włókna szklanego. W drugiej części rozdziału Autor porównuje rozdzielczość przestrzenną obrazów skanowania próbki uzwojenia, które zostały otrzymane technikami skanowania światłem strukturalnym oraz triangulacji laserowej.

Kolejny rozdział zawiera opis opracowanych urządzeń: jedno to urządzenie mechaniczne służące do odtwarzania warunków w trakcie nawijania cewki, drugie to urządzenie pomiarowe służące do wyznaczania geometrii przewodu nawiniętego na

dedykowanym elemencie. W drugiej części rozdziału Autor przedstawił algorytm obliczeń funkcji deformacji geometrii nawiniętego przewodnika z otrzymanych punktów pomiarowych oraz metodę wyznaczania wskaźników określających stopień deformacji geometrii.

W rozdziale siódmym zawarte są wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na opracowanym stanowisku badawczym dotyczących różnych parametrów uzwajania, takich jak siła naciągu oraz kierunek uzwajania czy skręcenie wstępne. Przebadane zostały przewody wykonane z żył o dwóch średnicach, tj 0,7 mm i 1 mm, z materiałów miedzi, stopu niobu z tytanem oraz stopu niobu z cyną.

W rozdziale ósmym Autor zaproponował oraz potwierdził potrzebę wykonywania dodatkowych pomiarów geometrycznych podczas uzwajania oraz utwardzania cewki czterobiegunowej. Przedstawiona metoda pomiarowa oraz sposób analizy umożliwia badanie zmian geometrycznych położenia przewodu w kolejnych etapach procesu produkcji cewki.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, zawierającym wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i oceną poziomu weryfikacji postawionych w pracy celów.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana praca doktorska reprezentuje wysoki poziom naukowy. Przedstawiona kompozycja pracy jest właściwa, poszczególne rozdziały tworzą logiczną i wspólną całość. Zaletą rozprawy jest przejrzysty układ treści, co powoduje, że zagadnienia prezentowane w pracy przedstawione są w sposób przejrzysty i konsekwentny.

Główną wartością pracy jest to, że Autor podjął się trudnego zadania: opracowania metody badawczej służącej ocenie poprawności uzwajania cewek przewodami typu Rutherford. W tym celu Autor zaprojektował specjalne urządzenie umożliwiające symulowanie procesu uzwajania cewek. Obserwowane deformacje przewodu w trakcie uzwajania próbek na zaproponowanym stanowisku są bardzo zbliżone do obserwowanych podczas uzwajania cewek na maszynie specjalistycznej. Kontrola stanu uzwojenia została przeprowadzona za pomocą zaprojektowanego optycznego urządzenia pomiarowego, a opracowany przez Autora algorytm umożliwia analizę deformacji przewodu na podstawie otrzymanych wyników pomiarowych.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne. Rozprawa napisana jest jasnym, poprawnym językiem. Dobór rysunków i wykresów uważam za właściwy.

Wszystkie wymienione tutaj elementy pracy stanowią o dużej jej wartości merytorycznej.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne, do których zaliczyłbym:

- prezentowane w rozdziale 6.3. funkcje opisujące transformacje współrzędnych są zbyt ogólne, stając się niezrozumiałymi dla czytelnika, np. we wzorze 6.4 nieznana postać macierzy transformacji T_1 , we wzorze 6.7 najprawdopodobniej wystąpił błąd w prezentowanych zależnościach na wyznaczenie normalizowanych odchyłeń punktów pomiarowych przynależnych poszczególnym powierzchniom. Przedstawienie przykładowych obliczeń dla wybranego punktu/punktów pomiarowych sprawiłoby, że ta część pracy byłaby czytelniejsza;
- Autor wprowadza wskaźniki deformacji w celu wykrywania wad powstałych na powierzchni przewodu po wykonaniu czynności nawinięcia, niemniej jednak brakuje informacji, jakie wartości tych wskaźników należy przyjąć za informację o bardzo dobrym/ dobrym/ dostatecznym czy niedopuszczalnym stanie powierzchni przewodu;
- przedstawione na rys. 4.25 wyniki przyrostów przemieszczeń pojedynczych żył przewodu w odniesieniu do położenia początkowego elementu (szczególnie dla kierunków osi X i Y) są w tym przypadku nic niewnoszące. Sensowniej byłoby odnieść przemieszczenia punktów referencyjnych w stosunku do położenia, jakie by zajęły, gdyby nie nastąpiła deformacja przewodu.
- ostatnia uwaga ma charakter propozycji. Na rys. 4.5 Autor przedstawia mapę naprężeń zredukowanych analizowanego elementu, podpisując rysunek "... von Misesa ...". W tej sytuacji można by przypomnieć części czytelnikom, poprzez podpis pod rysunkiem „.... Hubera and von Misesa ...”, o wkładzie polskiego uczonego w sformułowanie hipotezy wyteżeniowej, zwłaszcza że praca napisana jest w języku angielskim i ma szansę na rozpowszechnienie jej poza granicami naszego kraju.

W pracy zauważono kilka błędów redakcyjnych, które zostały przekazane do wiadomości Autora, np. na stronie 61 i 66 znajduje się odniesienie do nieistniejącego

rozdziału 0 czy na stronie 31 powtórzenie słowa „is” w zdaniu „The position of the spool is is ...”.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych realizację postawionego zadania należy ocenić wysoko ze względu na:

- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków, sklasyfikowanie oraz opisanie rodzajów deformacji przewodu typu Rutherford, na podstawie obserwacji uzwajania cewek prototypowych, opracowaną konstrukcję urządzenia do symulowania uzwajania cewek z dostosowywanymi parametrami procesu oraz geometrią próbki uzwojenia.
- opracowaną nowatorską maszynę skanującą próbkę uzwojenia, cechującą się trzema zautomatyzowanymi stopniami swobody oraz triangulacyjną głowicą laserową,
- opracowany algorytm analizy obrazu próbki, umożliwiający wyznaczenie wskaźnika ilościowego poszczególnych typów deformacji.
- zaplanowane i zrealizowane badania doświadczalne oraz wyciągnięcie z nich trafnych spostrzeżeń umożliwiających zaproponowanie modyfikacji urządzenia w celu poprawy jakości cech nawojowych cewek z przewodu typu Rutherford.

4. Ocena końcowa

Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską, należy podkreślić aktualność jej tematyki z punktu widzenia potrzeb konstrukcji i eksploatacji cewek magnesów nadprzewodnikowych. Zawiera ona elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny „Budowa i eksploatacja maszyn”, a zwłaszcza wiedzy dotyczącej metod badawczych deformacji przewodu typu Rutherford powstających w trakcie nawijania.

Uważam, że opiniowaną pracę Pana mgr. inż. Dariusza Pulikowskiego cechuje interdyscyplinarne podejście do zagadnień badawczych układów o złożonej naturze fizycznej, co stanowi stosowny wkład do budowy innowacyjnych cewek przeznaczonych dla magnesów nadprzewodnikowych.

Opracowane urządzenia i algorytmy, przeprowadzone badania stanowiskowe i badania symulacyjne oraz sposób realizacji tych badań świadczą o odpowiednim przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie do przewodu doktorskiego, określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

W razie pozytywnej oceny obrony rozprawy doktorskiej będę wnosił o jej wyróżnienie.

Stanisław Duda

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. **Dariusza Pulikowskiego**
Pt. „Badania doświadczalne i numeryczne uzwajania cewek
nadprzewodnikowych wykonanych z przewodu wielożyłowego Nb3Sn
Rutherford”

Wykonana na zlecenie Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 28 marca 2018 r.

**1. Tematyka, problemy naukowe podjęte w rozprawie, ich oryginalność oraz
znaczenie dla nauki i praktyki**

Przedstawiona do recenzji praca, napisana została pod kierunkiem dr hab. inż. Mirosława Pajora, profesora nadzwyczajnego ZUT, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Praca wykonana została w ramach programu CERN Doctoral Student oraz badań Future Circular Collider.

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów; załączono także wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, a także spis rysunków i tabel. W całości zawarto ją na 169 stronach. W bibliografii, autor przedstawił 69 trafnie dobranych pozycji literaturowych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Dariusza Pulikowskiego, należy do prac z zakresu teorii projektowania, a w celu określenia poprawności przyjętych założeń, potwierdzonej badaniami eksperymentalnymi. Autor podjął w niej problematykę związaną z opracowaniem procedury ilościowej oceny zdolności przewodu typu Rutherford, do nawijania cewek nadprzewodnikowych, a także analizę deformacji mającą na celu zdefiniowanie podstaw umożliwiających polepszenie jakości oraz powtarzalności geometrii produkowanych cewek nadprzewodnikowych.

Doktorant zaproponował przeprowadzenie badań zarówno teoretycznych jak też potwierdzenie ich na drodze doświadczalnej.

Autor w rozdziale pierwszym zaakcentował problematykę i potrzebę zajęcia się problemem, oraz zaprezentował bardzo skróconą strukturę pracy wraz z głównymi wynikami przeprowadzonych badań, z opisem infrastruktury badawczej Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych. W tym samym rozdziale, zaakcentowano problem zjawisk nadprzewodnictwa z ogólnym opisem przewodu typu Rutherford. Dokonano także opisu procesu projektowania uwzględniającego parametry geometrii cewki z wykorzystaniem oprogramowania ROXIE.

Kolejny, drugi rozdział poświęcony jest przybliżeniu problematyki związanej z opisem procesu uzwajania cewek nadprzewodnikowych na podstawie procedur oraz doświadczeń pochodzących z Large Magnet Facility w CERN. Omówiono w nim kinematykę maszyny do uzwajania z wykorzystaniem notacji Denavita Hartenberga, przeprowadzane operacje, oraz manualną korektę położenia przewodu. Zawarto w nim także problemy opisujące deformację przewodu zaobserwowaną podczas uzwajania prototypu cewki. W tym również rozdziale, doktorant płynnie zaakcentował główny problem będący elementem jego późniejszych zainteresowań jakim jest analiza deformacji a dokładniej kategoryzacja deformacji, charakterystyczna dla przewodu typu Rutherford określona na podstawie analizy momentu gnącego.

Rozdział trzeci to jasno i trafnie określone rozpatrywane zagadnienie naukowe w postaci tezy rozprawy doktorskiej opisującej główne cele pracy oraz jej zakres. Zawiera on jednocześnie konkluzję dotyczącą problemów, które na podstawie eksperymentów i symulacji numerycznych należy rozpoznać, a które są bezpośrednio powiązane z odkształceniem uzwojenia. Doktorant wskazuje, że istnieje możliwość eksperymentalnej oceny charakterystyk przewodów w celu automatycznego nawijania cewek nadprzewodzących. Autor wiąże to z analizą i koniecznością ilościowego określenia błędów produkcyjnych a także ich wpływu na tolerancje produkcyjne. Doktorant wyraźnie wskazuje na teoretyczny i empiryczny charakter pracy.

Aby uzyskać wysoką i powtarzalną jakość uzwojenia cewki, konieczne było zidentyfikowanie i zbadanie zjawisk powodujących mechaniczną deformację rozpatrywanego przewodu. Kolejny, czwarty rozdział prezentuje zatem wyniki modelowania przy użyciu MES (przede wszystkim skupiając się na zbadaniu

mechanicznych zależności procesu nawijania). Opisano w nim zasymulowane rozkłady naprężeń uzwojonego przewodu, wywołanego siłą naciągu.

Wykazano, że przedstawiony model pozwala na obserwację rozkładu nacisku przewodu nawiniętego, jednakże, ze względu na jego uproszczenia (tj. jednorodny materiał o przekroju prostokątnym), model nie mógł posłużyć do ostatecznie przyjętego badania zjawisk deformacji przewodu Rutherforda. W kolejnym kroku, doktorant zastosował zatem „ulepszony” rodzaj modelowania, w oparciu o poszczególne skrętki. Dokonano badań związanych z symulacją uzwajania zawierającą przewód typu Rutherford o dziesięciu żyłach. Do zdefiniowania deformacji plastycznej wykorzystano dane pochodzące z badań wytrzymałościowych żyły Nb_3Sn , a geometria przewodu została przebadana z wykorzystaniem tomografii komputerowej.

Przedstawiono funkcje deformacji, wygenerowane na podstawie dedykowanego algorytmu, co dało podstawę do stwierdzenia, że zaprezentowane obliczenia pozwalają potwierdzić wstępne obserwacje tylko w oparciu o MES. Opisywany rozdział kończy konkluzja, że głównym jego celem jest opracowanie układu doświadczalnego pozwalającego na walidację opisanych deformacji.

W rozdziale 5 zaprezentowano trzy badane technologie umożliwiające digitalizację powierzchni rozpatrywanego obiektu. Celem analizy z wykorzystaniem aktywnej termografii było zlokalizowanie poszczególnych żył przewodu Nb_3Sn typu Rutherford pod dwiema warstwami izolacji (włókno szklane i mika). W dalszej części, porównano rozdzielczość przestrzenną trzech urządzeń w celu wykonania skanowania 3D najwyższej jakości próbki uzwojenia – skanerów reprezentujących triangulację laserową i technologię z wykorzystaniem światła strukturalnego. W celu wyłonienia urządzenia o najwyższej rozdzielczości (do późniejszej weryfikacji wyników), dokonano analizy porównawczej rozdzielczości przestrzennej skanów próbki uzyskanych technikami laserowej triangulacji oraz skanowania światłem strukturalnym.

W rozdziale 6 doktorant zaprezentował autorskie urządzenie umożliwiające zdefiniowanie eksperymentalnej metodyki analizy uzwajania, wraz z możliwością uzyskania skanu próbki o wysokiej rozdzielczości w trzech stopniach swobody. Aby wyeliminować oscylacje utrudniające jakość pomiaru, zaproponowano częściowo

statyczny proces skanowania, w którym odległość czujnika od próbki mierzona była w momencie, gdy silniki utrzymywały stałą pozycję. Opisano także obliczone na podstawie wcześniej zaproponowanego algorytmu wyznaczniki, będące podstawą do ilościowego opisu trzech rodzajów deformacji, oraz metodę mającą na celu oszacowanie odkształcenia plastycznego próbki przewodu.

W rozdziale 7 pracy, bardzo interesująco opisano wyniki przeprowadzonych badań testowych. Oprócz pomiarów jakościowych, doktorant wyraźnie zwraca uwagę na aspekt powtarzalności pomiarowej związany z wykryciem wad zwijania badanych przewodów.

Bardzo pozytywne wrażenie robi zakres podjętych przez doktoranta prac doświadczalnych. Oprócz badań związanych z przeprowadzeniem ilościowej oceny deformacji przewodu typu Rutherford do nawijania cewek nadprzewodnikowych, autor zdefiniował adekwatną metodę weryfikacyjno-pomiarową. W tym celu zaprojektował dodatkowo urządzenie optyczne pozwalające na dokonywanie weryfikacji próbki uzwojenia. Ponadto, przy użyciu Metody Elementów Skończonych (MES) oraz analizy geometrii przewodu z wykorzystaniem absorpcji rentgenowskiej przeprowadził numeryczną symulację procesu uzwojania, co dało możliwość porównania symulacji teoretycznych z badaniami eksperymentalnymi.

Wyraźnie zauważyć można duże zaangażowanie doktoranta oraz połączenie wiedzy i umiejętności praktycznych w rozważaniu rozpatrywanych problemów. Wyraźnie podkreślić należy dopełnienie wszelkich elementów prawidłowo prowadzonego procesu badawczego z zachowaniem weryfikacji i powtarzalności otrzymanych wyników.

2. Ocena źródeł i stanu wiedzy w obszarze związanym z tematyką pracy

Autor dokonał prawidłowego przeglądu literatury, dokonał odpowiedniej oceny źródeł obszaru związanego z tematyką pracy (w tym literatury światowej). W pracy oparto się o 69 pozycji literaturowych (ostatnie z 2017 roku). Określono w sposób poprawny stan wiedzy dotyczący możliwego zastosowania przeprowadzonych badań w przemyśle, co świadczy o dostatecznej wiedzy autora na podejmowany temat. W sposób jasny i przekonujący sformułowano wnioski dotyczące zastosowanych źródeł literaturowych. Doktorant wykazał

się jednocześnie oryginalnością w ocenie swoich badań w stosunku do istniejących w rozpatrywanej dziedzinie. Jednocześnie wykazał prawidłowy dobór technik badawczych.

3. Uwagi merytoryczne i edytorskie

Praca, według mojej opinii, nie zawiera istotnych uwag merytorycznych. Bardziej dotyczą one pewnych ogólnych zagadnień edytorskich lub elementów, które doktorant może uwzględnić w swojej przyszłej pracy naukowej.

Pomimo tego, że autor wykazał się dużą starannością edytorską pracy, to nie uniknął błędów, które zresztą nie wpływają w znaczącym stopniu na jej treść merytoryczną.

Str. 51 – obrazy przekrojów próbki A, pokazanej na rysunku 4.8, oraz próbki B pokazanej na rys. 4.9 umożliwiające rozróżnienie poszczególnych włókien w pasmie, są dość niejasno oznaczone miarą jednostkową – należy znaleźć „klucz” jej interpretacji. Wydaje się, że lepiej byłoby zastosować tą samą miarę rozdzielczości dla obu rysunków. Niemniej, bardzo interesujące jest zaznaczenie rozbieżności pomiędzy czerwonymi i zielonymi liniami ilustrującymi stopień plastycznego odkształcenia pasma. Godnym podkreślenia jest także fakt zauważenia przez doktoranta zmian związanych z geometrią próbki, tj. dużą względną różnicą między szerokością a wysokością, co w efekcie wykorzystano w wykonaniu kolejnej (poprawionej) próbki (B), o korzystniejszym stosunku szerokości do wysokości.

Str. 66 – akapit pierwszy podrozdziału 4.3, wers 5 – odniesienie do nieistniejącego (pomyłkowego) rozdziału zerowego („see chapter 0”).

Str. 76 – brak opisu osi rysunku 5.16.

Str. 115 – 119 – na rysunkach 7.3 i 7.6 opisujących odpowiednio analizowane dane w funkcji masy uzwojenia i kierunku nawijania oraz wyniki uśrednione współczynników deformacji, dla łatwiejszej analizy, można byłoby zastosować ten sam przyjęty dla poszczególnych mas kolor. W pierwszym przypadku zastosowano dla poszczególnych obciążeń (5 kg, 20kg, 30 kg) kolejno kolory: niebieski, czerwony, zielony a drugim przypadku (prawdopodobnie pomyłkowo) kolory: czerwony, niebieski, zielony. W dalszym opisie, analiza przeprowadzona jest jak dla przypadku pierwszego (mas). Co prawda dalej analiza różnic dotyczących kierunku nawijania jest prawidłowa, niemniej w całości dla osoby czytającej może to powodować pewien chaos. Biorąc jednak pod

uwagę przedstawione wyniki odkształcenia (rysunek 7.2), stabilność (rysunek 7.3) i symetrię boczną (rys. 7.6) jako kryteria jakości uzwojenia można prawidłowo zdefiniować parametry prowadzące do najmniejszej deformacji.

Po lekturze recenzowanej rozprawy, dla uzyskania wydaje się istotnych elementów naukowych w dalszej pracy doktoranta, nasuwają się następujące pytania:

1. *Najlepsza stabilność w izolowanym przewodzie jest uzyskiwana bez wstępnego skręcania (to jest 0 °). Najlepszą stabilność skrętki osiąga się dla 45 °. Warstwa izolacyjna wykazała pozytywny wpływ na stabilność samego uzwojenia – czy należałoby zatem rozpatrzyć przeprowadzenie badań np. dla „błędnie/wadliwie” wykonanych izolacji ? Na ile mogą one mieć wpływ na samą deformację ?*
2. *Przeprowadzone testy uzwojenia, opisane w rozdziale 7.2, dowiodły, że dodatkowa korekcja trajektorii uzwojenia przez dodanie obrotowego DOF byłaby korzystna dla stabilności i jakości procesu nawijania. Jedną z propozycji byłoby zatem opracowanie narzędzi (np. urządzenia do zaciskania cewki) i zbadanie ich działania oddzielnie przed integracją z kompletnym systemem nawijania. Bardzo ważnym zadaniem podporządkowanym temu rozwojowi jest wdrożenie odpowiednich systemów monitorowania (oprzyrządowania), które pozwalają śledzić geometryczną pracę cewki podczas procesu zwijania. Na ile możliwe jest rozpatrzenie monitorowania nawijania cewek w trybie „on-line” w tzw. procedurze bezinwazyjnej ? Może wykorzystanie np. analizy częstotliwościowej emitowanych przez materiał fal sprężystych ?*

4. Ocena strony redakcyjnej

Praca wydana bardzo starannie. Nie budzi żadnych zastrzeżeń pod względem redakcyjnym.

5. Wnioski końcowe

W świetle wszystkich przytoczonych argumentów, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Dariusza Pulikowskiego pt. „Badania doświadczalne i numeryczne uzwojenia cewek nadprzewodnikowych wykonanych z przewodu wielożyłowego Nb₃Sn Rutherford” jest rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego i spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim (zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z późniejszymi zmianami Dz. Ustaw z 2017 r., poz. 1789). Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów procedury przewodu doktorskiego.

Uchwała nr 39/2018
Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego w Szczecinie
z dnia 29 maja 2018 r.

w sprawie: nadania stopnia doktora **mgr. inż. Dariuszowi Pulikowskiemu.**

§ 1

Rada Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, działając na podstawie art. 14 ust.2 pkt 5 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26.09.2016, (Dz.U. z dn. 30.09.2016 r, poz. 1586), w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora nadaje **mgr. inż. Dariuszowi Pulikowskiemu** stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

§ 2

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Rady Wydziału
Dziekan

dr hab. inż. Mirosław Pajor, prof. nadzw.