

Dr hab. Marian CISZEK
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław, dnia 30. 04. 2016 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja GRABOWSKIEGO pt: „Modelowanie stanów awaryjnych systemu kriogenicznego reaktora termonuklearnego”

Praca doktorska mgr inż. Macieja GRABOWSKIEGO została wykonana w Katedrze Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Macieja Chorowskiego. Zrealizowana została ona w ramach umowy o współpracy między Wydziałem Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej a Organizacją ITER mieszczącą się w Cadarache we Francji oraz Europejską Organizacją Badań Jądrowych CERN znajdującą się w Genewie w Szwajcarii.

Uwagi wstępne

Niniejsza rozprawa została poświęcona wybranym aspektom modelowania awarii w systemach kriogenicznych. Podjęta tematyka pracy doktorskiej jest nowatorska i odważna, biorąc pod uwagę złożoność problemów wynikających z zapewnienia bezpiecznej pracy przyszłej elektrowni produkującej na wielką skalę energię z kontrolowanej fuzji jądrowej. Model eksperymentalny takiej elektrowni jest obecnie projektowany i budowany. Będzie to niewątpliwie największe urządzenie techniczne dotychczas budowane przez człowieka, o niespotykanej do tej pory złożoności, które połączy ze sobą dwa ekstremalne obszary temperatur, wysokiej-kontrolowanej syntezy termojądrowej, oraz najniższych, w pobliżu zera bezwzględnego - zapewniających pracę urządzeń nadprzewodnikowych. Zbudowanie takiej elektrowni, czystej ekologicznie, na paliwie tanim i ogólnie dostępnym, rozwiązałoby problemy energetyczne ludzkości na pokolenia. Zagadnienia poruszane w recenzowanej tu pracy doktorskiej są ważnymi przyczynkami do przyszłego sukcesu efektywnej i bezpiecznej pracy budowanego reaktora termojądrowego. Taki eksperymentalny reaktor (ITER) budowany jest obecnie w Cadarache (Francja) a w projekcie uczestniczą finansowo i naukowo: Unia Europejska, Japonia, Rosja, Stany Zjednoczone, Chiny, Korea Południowa i Indie.

Wg1PW/692/2016
Wydział Mechaniczno-Energetyczny

System kriogeniczny reaktora ITER będzie największym zbudowanym do tej pory skupionym systemem zawierającym ponad 20 ton helu w postaci gazowej i ciekłej. Ilość energii zgromadzonej w systemie kriogenicznym reaktora (głównie magnesy nadprzewodnikowe i doprowadzenia pradowe) będzie przekraczać 30 GJ. Taką energię można określić równoważnikiem trotylowym TNT w ilości bliskiej 7.5 tony materiału wybuchowego, co jak widać, stanowi poważny problem związany z zagrożeniem bezpieczeństwa całego systemu kriogenicznego ITER.

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, jest stosunkowo obszerna, wydrukowana w formacie A4 na 124 stronach i składa się ze wstępu (wprowadzenia), czterech głównych rozdziałów. Każdy rozdział kończony jest podsumowaniem zawierającym najważniejsze wnioski i wyniki tam uzyskane. Całość pracy doktorskiej zwieńczona jest konkluzjami wypływającymi z przeprowadzanych tu badań naukowych. Umieszczona na końcu dysertacji bibliografia dotycząca tematu badań obejmuje 72 pozycje literaturowe, w tym osiem publikacji, których Doktorant jest współautorem. Tekst pracy uzupełniony jest 133 rysunkami i wykresami oraz 13 tabelami, prezentującymi najważniejsze uzyskane wyniki podjętych badań naukowych.

Rozprawa doktorska przedstawia następujący główny zakres prac:

- analizę systemu kriogenicznego reaktora termojądrowego ITER oraz jego podział na poszczególne węzły kriogeniczne.
- systematykę awarii systemu kriogenicznego pod względem charakteru uszkodzenia i skutków zdarzenia.
- opracowanie modeli matematycznych pozwalających na wyznaczenie parametrów termodynamicznych układu podczas awarii systemu kriogenicznego.
- przeprowadzenie analizy stanów awaryjnych systemu kriogenicznego ITER.
- weryfikacja doświadczalna niektórych wybranych scenariuszy awarii.

Poruszone problemy, związane z wybranymi aspektami modelowania awarii w systemach kriogenicznych prowadzą, według Doktoranta, do sformułowania następujących tez zawartych w swojej rozprawie doktorskiej:

1. analiza przebiegów oraz skutków awarii systemu kriogenicznego reaktora termojądrowego może być przeprowadzona metodami termodynamicznymi zastosowanymi dla wyodrębnionych węzłów kriogenicznych.
2. skutki uszkodzeń węzłów kriogenicznych zawierających sprężone gazy mogą być analizowane metodami termodynamicznymi i nie wymagają stosowania metody

równoważnika trotylowego TNT bazującej na określeniu ilości energii zmagazynowanej w zbiornikach ze sprężonym gazem, wyrażonej w kilogramach TNT

Treść pracy doktorskiej

Rozdział 1 jest krótkim i wyczerpującym wprowadzeniem do zagadnień z zakresu podstaw fizyki fuzji termojądrowej, jej naukowej historii oraz dotychczasowych osiągnięć eksperymentalnych związanych z jej zastosowaniami praktycznymi. Przedstawiono tu główne założenia koncepcyjne centralnej i najważniejszej części eksperymentalnego reaktora termojądrowego ITER oraz systemu kriogenicznego podtrzymywania nadprzewodnictwa w jego kilkudziesięciu elektromagnesach. System kriogeniczny wykorzystany w reaktorze ITER składać się będzie ze sprężarek i skraplarek helu, systemu dystrybucji zimnego helu do magnesów nadprzewodnikowych oraz głównych linii kriogenicznych łączących poszczególne zespoły. Będzie on charakteryzował się 83 węzłami kriogenicznymi, w których istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia kilkuset różnych uszkodzeń, prowadzących do powstania stanu awaryjnego systemu. Te potencjalne zagrożenia są właśnie przedmiotem badań podjętych przez Doktoranta.

W rozdziale 2 analizowane są wybrane stany awaryjne systemu chłodzenia samego reaktora termojądrowego z uwzględnieniem potencjalnych zagrożeń dla personelu pracującego w rejonie awarii. Skupiono się tu na przedstawieniu podstawowych mechanizmów fizycznych oraz typowych sekwencjach zdarzeń potencjalnie prowadzących do wystąpienia danej awarii. Podano również wskazówki umożliwiające oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia danego typu dysfunkcji systemu. Informacje tu zawarte mogą zostać wykorzystane jako zbiór wytycznych do przygotowania scenariuszy akcji ewakuacyjnej lub ratunkowej. Przedstawione klasyfikacje stopnia krytyczności awarii mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu systemów sygnalizacji alarmowych. W oparciu o ocenę krytyczności możliwych dla danego układu awarii, zalecane może być również instalowanie dodatkowych zabezpieczeń chroniących przed wystąpieniem takich właśnie szczególnie groźnych defektów, np. dodatkowe osłony chroniące najbardziej wrażliwe fragmenty instalacji kriogenicznej.

W rozdziale 3 przedstawiono modele matematyczne najważniejszych elementów węzła systemu kriogenicznego i zaprezentowano wyniki symulacji stanów awaryjnych węzła przeprowadzonych z użyciem wspomnianych modeli. Podstawowym rezultatem opisanych

symulacji było wykazanie, że stosunkowo dokładna wstępna analiza stopnia zagrożeń stanami awaryjnymi w węźle kriogenicznym jest możliwa już na etapie jego projektowania.

Modele numeryczne użyte do przeprowadzania symulacji stanów awaryjnych systemu kriogenicznego reaktora zostały stworzone w środowisku programistycznym Visual Basic for Applications VBA. Napisane programy obliczeniowe bazują na równaniach tu opisanych oraz używają szeregu funkcji oferowanych przez program REFPROP (**R**eference **F**luid **T**hermodynamic and **T**ransport **P**roperties). Zaletą programu REFPROP wykorzystanego w tworzonych aplikacjach obliczeniowych jest to, że potrafi on wyznaczyć z dużą dokładnością parametry termodynamiczne punktu stanu wybranego płynu bądź mieszaniny.

System kriogeniczny reaktora, składający się z podsystemu sprężarek helu i azotu, głównych linii kriogenicznych, podsystemu krio-dystrybucji w budynku reaktora oraz głównego kriostatu reaktora termojądrowego został poddany analizie stanów awaryjnych. Powyższy system podzielono na 83 węzły kriogeniczne, w których istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia 715 różnych wad prowadzących do powstania stanu awaryjnego pracy danego systemu. Na podstawie oceny krytyczności awarii wybrano 41 najbardziej krytycznych przypadków, dla których wykonano numeryczne symulacje stanów awaryjnych. W dalszej części tego rozdziału pracy przedstawiono wyniki kilku symulowanych przypadków sytuacji awaryjnych takich jak np. rozszczelnienie rury próżniowej w linii kriogenicznej, pęknięcie rury procesowej w linii kriogenicznej, przejście rezystywne magnesów w kriostacie reaktora termojądrowego oraz powstanie łuku elektrycznego w magnesie nadprzewodzącym lub jego pobliżu.

Wykorzystanie procedur obliczeniowych zaprezentowanych przez Doktoranta umożliwia na przykład wychwycenie typowych błędów projektowych polegających na zastosowaniu nieodpowiednich zaworów bezpieczeństwa. Umożliwia również weryfikację istniejących przepisów bezpieczeństwa i procedur ewakuacyjnych. Podane tutaj modele matematyczne pozwalają również na opracowanie lub modyfikację dodatkowych procedur serwisowych obejmujących okresowe sprawdzenie stanu technicznego fragmentów instalacji o krytycznym znaczeniu z punktu bezpieczeństwa. Symulacje numeryczne pozwalają również na uniknięcie przeprowadzania kosztownych i niebezpiecznych testów eksperymentalnych stanów awaryjnych. Przedstawiona metodologia symulacji stanów awaryjnych oraz oceny krytyczności ich skutków może zostać wykorzystana także do stworzenia procedur audytu bezpieczeństwa systemów kriogenicznych. Jak twierdzi Doktorant, takie procedury nie zostały jeszcze na świecie formalnie opracowane w postaci norm prawnych.

Rozdział 4 pracy zawiera rezultaty eksperymentalne weryfikujące wcześniej otrzymane wyniki modeli matematycznych opisujących rozkład fali ciśnienia po wybuchu zbiorników ze sprężonym gazem. W tym celu zostało zaprojektowane, zbudowane i uruchomione przez Doktoranta stanowisko badawcze pozwalające na pomiar rzeczywistego zjawiska fizycznego wybuchu kontrolnego zbiornika zawierającego sprężony gaz. System ultradźwiękowego wykrywania helu w powietrzu pozwalał na szybką detekcję rozprzestrzeniania się tego gazu a stała czasowa zbudowanego urządzenia nie przekraczała stu milisekund. Daje to znaczną przewagę tej metody w porównaniu ze starszą metodą detekcji przy użyciu detektorów elektrochemicznych.

Eksperymenty przeprowadzono w części tunelu akceleratora w CERN. Monitorowane było ciśnienie czoła fali wybuchu, jego prędkość propagacji, zmiany temperatury, wpływ wentylacji wymuszonej w tunelu, także rodzaju sprężanego gazu (hel, azot). Uzyskane bogate wyniki eksperymentów pozwoliły na wysnucie wniosku, że opisana w pracy analiza termodynamiczna wybuchu jest słuszna i może być użyta jako alternatywa dla metody stosującej ekwiwalent TNT. Według Autora niektóre różnice między modelem termodynamicznym a wynikami doświadczalnymi w zrealizowanych eksperymentach mogą wynikać z pewnych rozbieżności między założeniami modelu matematycznego a rzeczywistymi warunkami eksperymentu. Uzyskane wyniki mogą zostać wykorzystane np. w CERN do aktualizacji procedur bezpieczeństwa dotyczących eksploatacji nadprzewodnikowych magnesów, dodatkowo mogą służyć do weryfikacji dokładności modeli numerycznych opisujących propagację fali gazowego helu we wnętrzu tunelu zawierającego instalacje kriogeniczne.

Uwagi ogólne

Praca doktorska pod względem redakcyjnym opracowana jest dobrze, jest czytelna, zawiera dużo kolorowych rysunków wraz z dokładną dokumentacją stanowiska pomiarowego oraz uzyskanych wyników eksperymentalnych. Język pracy jest językiem ścisłym, jasnym i zrozumiałym, co jest zaletą pracy, ułatwiającą jej lekturę. Niemniej, spotyka się sporadycznie w tekście pracy niezgrabności stylistyczne, niekiedy wynikłe tylko z błędów literowych. Z obowiązku recenzenta pragnę zwrócić uwagę także na pewne niedociągnięcia widoczne w pracy. Oto wykaz tylko niektórych z nich:

- na str. 29, str. 35 a str. 38 (wzory 3.14, 3.27 i 3.35, odpowiednio) użyto symbolu λ do oznaczenia dwóch różnych parametrów fizycznych: przewodnictwa cieplnego i oporów liniowych

- zamiast użytego zwrotu „ciśnienie próżni” może lepiej brzmieć np. zwrot „wartość próżni”? Co znaczy „próżnia o wysokich parametrach”?
- na str. 31 opis budowy i grubości składników folii MLI jest nieścisły
- podpisy pod rysunkami 3.3 i 3.4 powinny dotyczyć ciśnień *parcjalnych* powietrza oraz helu
- symbol L używany jest do oznaczenia wymiaru charakterystycznego w równaniu na liczbę Nusselta (3.37) a także na oznaczenie indukcyjności magnesu (3.41 i 3.47)
- kolejny konflikt oznaczeń: we wzorze 3.54 oznaczenie W jest tu dla energii, natomiast we wzorze 3.63 ta sama litera oznacza masę materiału wybuchowego.
- zależność dana wzorem 3.47 jest źle opisana: e_L jest siłą elektromotoryczną (a nie samoindukcją cewki) natomiast L jest tu indukcyjnością własną cewki
- nie jest zrozumiałe dlaczego do oznaczenia temperatury użyto we wzorach 3.44-3.46 symbolu θ zamiast dotychczasowego T
- pod rysunkami 3.41 i 3.42 brakuje cytowanego odnośnika literaturowego
- zamiast „dziur w cewce” (str. 70) można użyć bardziej trafnego słowa, np. „otwory, kanały, itp.
- używana w pracy fraza „metaliczna konstrukcja” odnosi się do metalicznego koloru (wykończenia) konstrukcji czy też może chodzi o *konstrukcję metalową*?
- używany zwrot „instalacja hydrauliczna danego magnesu” wydaje się być mylący, chyba chodzi po prostu o „instalację systemu chłodzenia magnesu”
- ze względu na zbyt mały rozmiar większości rysunków (wykresów) są one bardzo trudne do odczytania, szczególnie dotyczy to indeksów krzywych

Podczas studiowania recenzowanej rozprawy doktorskiej nasunęły się pewne uwagi krytyczne i wątpliwości z których najważniejsze wymienione są poniżej:

- obszerne dane wejściowe do obliczeń numerycznych, zawarte w tabeli 3.7 (str.69), są założone przez Doktoranta, czy też zaczerpnięte z innych źródeł; jeśli tak, to brak jest tutaj referencji. Ponadto jedna sekcja w tej tabeli jest omyłkowo powtórzona.
- pewnych wyjaśnień wymagają też dane dotyczące strat mocy na prądy wirowe przedstawione na rysunkach 3.43 (str.71). Dla jakich prądów początkowych w cewce są te dane? Czy energia, początkowo zawarta w polu magnetycznym cewki, dzieli się na część rozpraszaną w samym uzwojeniu magnesu (kompozyt NbTi/Cu) i na tę rozpraszaną w konstrukcjach wsporczych, położonych dalej od samego źródła pola magnetycznego? Dlaczego moc rozpraszana w konstrukcjach wsporczych (*nota bene*: nie podano z jakiego

materiału zrobione są te konstrukcje?) jest znacznie większa niż moc rozpraszana w częściach „...konstrukcji metalicznej..” magnesu? Podobne uwagi dotyczą rozważań Doktoranta, dosyć niepełnych i niejasnych, dotyczących wpływu łuku elektrycznego na strumień ciepła wnikający do cewki magnesu, a zawarte w podrozdziale 3.10.4, str. 77-81.

- wykresy na rysunku 3.14 przedstawiają zależności nadciśnienia fali wybuchu od odległości od jego centrum. Jak podaje podpis do rysunku, zależności te wykonano na podstawie równania 3.62. Jednak równanie to nie łączy ze sobą bezpośrednio wielkości przedstawionych na wykresie. Dla większej przejrzystości (i zrozumienia) należałoby podać krótko dodatkowe procedury matematyczne jakie zastosował Autor wykreślając rzeczne zależności. Należałoby też podać sens fizyczny liczb przy wielkościach Z , r , W , w równaniach 3.64-3.67, gdyż mają one swoje pewne wymiary.
- rozważania dotyczące modelowania przejścia rezystywnego magnesu nadprzewodnikowego, zawarte na str. 39-41 są bardzo uproszczone i dotyczą tylko materiału NbTi. W rzeczywistości przewody są wielożyłowe, kompozytowe, z matrycą wykonaną głównie z miedzi. Matryca ta w bardzo istotny sposób rządzi rozkładami temperatur i dystrybucją energii cieplnej w rozpatrywanym magnesie; wzór 3.43 powinien to uwzględnić. Ponadto we wzorach 3.44-3.46 nie podano które magnetyczne pole krytyczne jest tam opisywane. W pracy autor używa sformułowania "*magnes nadprzewodzący*" zamiast zalecanego "*magnes nadprzewodnikowy*". Bardziej eleganckim wydaje się zwrot "*magnes nadprzewodnikowy*", bo zrobione z nadprzewodników (a nie zawsze nadprzewodzące, np. powyżej temperatury krytycznej).
- w części eksperymentalnej pracy: rejestracja ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu zbiornika ze sprężonym gazem (He lub N₂) oraz porównanie uzyskanych wyników z modelem teoretycznym; najlepsze dopasowanie uzyskano dla tzw. modelu termodynamicznego, danego wzorem 3.68 (str.49). Należałoby się spodziewać najlepszego dopasowania dla wersji kontrolowanego wybuchu zbiornika, gdy fala wybuchu rozchodzi się symetrycznie od epicentrum. Istotnie tak jest, np. dla eksperymentu danego wykresami 4.24 i 4.30. Natomiast równie dobre dopasowanie otrzymano dla wybuchu „niesymetrycznego”, jak przedstawia to rys. 4.27 i 4.36. Czym może być spowodowana ta niejasność? W przypadku rozcięcia zbiornika o małych wymiarach strumień gazu go opuszczający jest asymetryczny w stosunku do początkowego kształtu zbiornika (gazu przed wybuchem), a więc daleki od założeń danych równaniami 3.68 i 4.6.

Ocena pracy i wnioski końcowe

Omawiana tu praca doktorska jest pewną próbą dokładnego zbadania kilku ważnych problemów dotyczących bezawaryjnej eksploatacji systemów chłodzenia kriogenicznego w systemach elektrotechnicznych wykorzystujących m.in. nadprzewodnikowe magnesy wysokich energii. W dysertacji przedstawiono podstawowe rodzaje awarii potencjalnie mogących pojawić w takich systemach oraz wynikające z tego zagrożenia dla personelu i rozpatrywanych urządzeń, a także sposoby zapobiegania tym niepożądanym zjawiskom. W pracy badawczej podjęto również próbę eksperymentalnej weryfikacji opisanych teoretycznie mechanizmów wybranych awarii kriogenicznych. Na uwagę zasługują prace eksperymentalne przeprowadzone w tunelu akceleratora w CERN, dotyczące badania propagacji obłoku helowo-powietrznego. Do śledzenia zmian rozkładu koncentracji helu w różnych punktach tunelu zbudowano unikalny system pomiarowy, wykorzystujący ultradźwiękowe mierniki stężenia helu, zaprojektowane i zbudowane przez Doktoranta na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Wyniki zawarte w pracy mogą posłużyć projektantom instalacji kriogenicznych do oceny możliwych zagrożeń wynikających z awarii instalacji oraz mogą one zostać również wykorzystane do projektowania odpowiednich zabezpieczeń.

Podane powyżej omówienie wyników recenzowanej dysertacji pokazuje, jak obszerny zakres prac został wykonany przez Doktoranta, począwszy od literaturowych badań studyjnych, a skończywszy na wykonaniu obliczeń numerycznych oraz eksperymentalnej ich weryfikacji. Jego praca jest samodzielna, co świadczy o dojrzałości naukowej i dużym już doświadczeniu w prowadzeniu prac badawczych.

Podsumowując uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Grabowskiego spełnia ustawowe, jak i merytoryczne, wymagania stawiane pracom doktorskim (ustawa z dnia 14.03.2003, Dz. U. Nr 65/03 poz. 595, z późniejszymi zmianami Dz. U. Nr 15.04, poz. 128) i wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Dr hab. Marian CISZEK

