

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Warszawa, 23 października 2018 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 13 listopada 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Łukasza Butkowskiego

temat: „Protection and Measurement System for High Power RF Tube Amplifiers Used in Particle Accelerators”

promotor – prof. dr hab. inż. Jerzy Szabatin z Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

dr hab. inż. Sławomir Wronka, prof. Narodowego Centrum Badań Jądrowych

dr hab. inż. Janusz Marzec, prof. Politechniki Warszawskiej

Obrona odbędzie się w dniu 13 listopada 2018 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 13³⁰.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Protection and measurement system for high power RF tube amplifiers used at particle accelerators.

Łukasz Butkowski, M.Sc.

Streszczenie

Klistrony są wyspecjalizowanymi lampami próżniowymi, które pracują w akceleratorze XFEL (ang. European X-Ray Free Electron Laser) jako wzmacniacze RF dużej mocy. Ze względu na wysoki koszt akceleratora XFEL oraz wymagany długi czas dostępności żąda się, aby trwałość klistronów przekraczała 60000 godzin pracy. Tak długi czas życia tych urządzeń nie zawsze jest łatwy do osiągnięcia. Podczas rzeczywistej eksploatacji żywotność klistronów może być znacząco zredukowana w zależności od warunków eksploatacji.

W celu sprostania powyższemu wyzwaniu autor zaprojektował specjalny system ochronno-pomiarowy przedstawiony w niniejszej pracy. System ten został nazwany systemem KLM (ang. Klystron Lifetime Management system). Jego głównym zadaniem jest nadzorowanie pracy klistronu oraz wykrywanie w jak najkrótszym czasie wszystkich niepożądanych zdarzeń, które mogą uszkodzić urządzenie, a w przypadku wykrycia takiego zdarzenia – odłączenie sygnału sterującego RF lub wysokiego napięcia zasilającego klistron. Wykrywanie zdarzeń opiera się na porównaniu chwilowej wartości rzeczywistego sygnału uzyskanego na wyjściu systemu z wartością oszacowaną na podstawie modelu wzmacniacza dużej mocy oraz sygnałów wejściowych. System KLM został zrealizowany w układach FPGA (ang. Field Programmable Gate Array) oraz wdrożony przy użyciu standardowych elementów systemu LLRF (ang. Low Level Radio Frequency) opartego na architekturze MTCA.4. Głównymi zagadnieniami prezentowanymi w niniejszej rozprawie są zaprojektowanie, wykonanie oraz wdrożenie systemu KLM.

Przedstawiony system został pomyślnie przetestowany w ośrodku DESY (niem. Deutsches Elektronen-Synchrotron) w Hamburgu. System poprawnie wykrywa zdarzenia takie jak: wyładowanie RF wewnątrz klistronu, wyładowanie RF w falowodzie, wzrost mocy odbitej na wejściu klistronu, wyładowanie wysokiego napięcia, iskrzenie w falowodzie oraz pogorszenie próżni. Całkowity czas reakcji systemu na powyższe zdarzenia jest w granicach 500 ns. Przez okres ponad czterech lat system KLM był używany na stanowisku testowym, gdzie został wykorzystany do przetestowania wszystkich klistronów akceleratora XFEL przed ich instalacją w tunelu. Po tym okresie system został ostatecznie zainstalowany w każdej z 27 stacji RF akceleratora XFEL.

**KWESTIONARIUSZ- RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy: Protection and Measurement System for High Power RF Tube
Amplifiers Used in Particle Accelerators**

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Butkowski

Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa przedstawia dokonania Autora w trakcie realizacji oryginalnego projektu systemu zabezpieczeń generatorów mocy mikrofalowej (klistronów) zasilających liniowy akcelerator elektronów kompleksu XFEL (European X-ray Free Electron Laser) pod Hamburgiem, który właśnie, po wielu latach budowy, rozpoczyna pracę.

XFEL składa się z dwóch części: klasycznego liniowego akceleratora elektronów o długości 2,1 km, zawierającego 100 nadprzewodzących modułów przyspieszających zasilanych z 25 wielowiązkowych klistronów o mocy 10 MW każdy, pracujących na częstotliwości 1,3 GHz, przyspieszających elektrony do energii 17,5 GeV oraz z sekcji generującej impulsy laserowego promieniowania rentgenowskiego o energii kilku keV. Sekcja ta zawiera 3 tzw. undulatory, każdy o długości ponad 200 m, w których, z wykorzystaniem zjawiska emisji promieniowania synchrotronowego, część energii wiązki elektronów jest przetwarzana na błyski promieniowania rentgenowskiego o dużej intensywności.

Końcowy produkt kompleksu XFEL, spójna wiązka fotonów o długości fali od kilku do 0,1 nm, otwiera nowe pole badań struktur o takich rozmiarach. Stanowi szansę uzyskania znaczących rezultatów na takich polach badań jak: badanie atomowej struktury wirusów, obserwacja struktury cząsteczkowej w reakcjach chemicznych, badanie nanostruktur itp.

Jak w każdym systemie o dużej złożoności zagadnienie niezawodności podzespołów ma fundamentalne znaczenie. Uwaga Autora jest skupiona na klistronach dostarczających energii mikrofalowej akceleratorowi. Jako urządzenia bardzo dużej mocy są szczególnie narażone na awarie gdy ich warunki pracy zaczną odbiegać od nominalnych. Szczególnie groźnym zjawiskiem są wyładowania iskrowe które mogą się pojawiać w ich wnętrzu. Jeśli proces takiego wyładowania nie zostanie przerwany dostatecznie szybko prowadzi do uszkodzenia powierzchni rezonatorów. Degradacja jakości powierzchni wnek rezonansowych postępująca w czasie zwiększa prawdopodobieństwo występowania kolejnych przebić a odparowana w trakcie wyładowania miedź osadzając się na ceramicznych okienkach klistronu zwiększa współczynnik odbicia fali.

Autor stawia sobie za cel opracowanie koncepcji, zaprojektowanie i realizację systemu monitorowania warunków pracy klistronów akceleratora XFEL, który w krótkim czasie (mniejszym niż 1 mikrosekunda) pozwoli zareagować, poprzez zdjęcie wysokiego napięcia, na pojawiające się przebicie w klistronie i w wysokonapięciowych obwodach urządzeń współpracujących. Dodatkowo system ma monitorować jakość próżni wewnątrz klistronów, gdyż jej pogorszenie również może skutkować pojawieniem się przebić. System zaprojektowany przez Autora nie jest autonomiczny – jest zintegrowany z systemem sterowania zespołu klistronów, którego głównym zadaniem jest zapewnienie jakości wiązki elektronowej poprzez precyzyjną synchronizację pracy wszystkich klistronów. Korzysta z infrastruktury sygnałowej, takich samych dodatkowych kart analogowych i kart, wykorzystujących FPGA, służących do przetwarzania sygnałów cyfrowych.

Praca ma charakter zaawansowanego projektu technicznego, zawierającego istotny

komponent charakteryzowania i modelowania używanych klustronów oraz badania funkcjonowania i testowania systemu na stanowiskach testowych.

Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Europejski laser rentgenowski na swobodnych elektronach (XFEL) jest urządzeniem unikalnym, w sensie długości fal generowanego promieniowania, w skali światowej. Co prawda, jego budowniczości korzystali z doświadczeń zdobytych przy innych podobnych systemach, np. FLASH w DESY, ale każdy nowy akcelerator, to wiele nowych koncepcji realizacyjnych. Jest to szczególnie widoczne w przypadku osprzętu elektronicznego. Każde kilka lat, to nowe, wynikające z postępu elektroniki, możliwości przetwarzania sygnałów, nowe, możliwe teraz do zrealizowania, koncepcje i architektury. Z tego punktu widzenia, samo miejsce realizacji projektu daje gwarancję, że projekt jest realizowany na wysokim poziomie technicznym.

Pracując w dużym międzynarodowym zespole, Autor rozprawy samodzielnie zrealizował następujące zadania: wybór użytego sprzętu, zaimplementowanie algorytmów przetwarzania sygnałów w FPGA, zaprojektowanie i zaimplementowanie oprogramowania wysokiego poziomu (komputerowego), zintegrowanie własnego systemu monitorowania z systemem nadzoru i sterowania akceleratora (Low Level Radio Frequency system), instalowanie i badanie klustronów na stanowisku pomiarowym oraz koordynacja procesu instalacji własnego systemu monitorowania w urządzeniu XFEL.

Zaprojektowany przez Autora system monitorowania korzysta z sygnałów WCZ dostarczanych przez sondy zainstalowane we wnękach rezonansowych na wejściu i dwóch wyjściach każdego klustronu. Sygnały te są przetwarzane przez system LLRF, z wykorzystaniem cyfrowego algorytmu niekwadraturowej demodulacji do postaci sygnału niosącego informację o amplitudzie i fazie pola elektromagnetycznego. Pozwala to Autorowi uzyskać informację o amplitudzie na wejściu i obu wyjściach oraz o wartości współczynnika odbicia fali w tych miejscach. Te sześć sygnałów stanowi minimum pozwalające kontrolować warunki pracy klustronu. Ponieważ jednak sprzęt stosowany w LLRF, którego Autor także używa, ma 10 wejść sygnałów analogowych, Autor przetwarza dodatkowo 4 sygnały. Pierwsze dwa – napięcie i prąd działają elektronicznego klustronu pozwalają dodatkowo monitorować stan zasilacza wysokiego napięcia, sygnał prądu pomp jonowych pozwala kontrolować jakość próżni w klustronie a sygnał z fotodetektorów stanowi dodatkowy, redundantny, kanał wykrywania przebiegów w klustronie.

Charakterystyki przejściowe wzmacniaczy klustronowych są silnie nieliniowe i różnią się dość znacznie, szczególnie charakterystyki fazowe, dla różnych egzemplarzy klustronów. Autor decyduje się wykorzystywać, zamiast indywidualnych charakterystyk poszczególnych klustronów, indywidualnie sparametryzowane modele wzmacniaczy klustronowych. Autor analizuje przydatność 6, znanych z literatury, modeli wzmacniaczy. Po wnikliwych badaniach wybiera tzw. zmodyfikowany model Rappa, który, po starannej parametryzacji, zapewnia dokładność modelowania charakterystyki lepszą niż 2 %.

Opracowując algorytmy przetwarzania sygnałów w FPGA, autor dużo uwagi poświęca szybkości działania tych algorytmów aby uzyskać czas reakcji systemu monitorowania poniżej wstępnie założonej wartości 1 mikrosekundy. Ostatecznie udaje się uzyskać czas reakcji poniżej 400 ns, przy czym prawie połowę tego czasu stanowi opóźnienie wprowadzane przez przetworznik ADC, a więc czynnik na który Autor nie miał wpływu.

Działanie systemu monitorowania zostało solidnie przetestowane na stanowisku pomiarowym. Poszczególne klustrony były badane przez czas od tygodnia do miesiąca. Pozwoliło to zaobserwować wiele sytuacji awaryjnych, takich jak: przebiecia w klustronach, przebiecia w obwodach wysokiego napięcia, podwyższone współczynniki odbicia na wejściu i wyjściach, czy wreszcie pogorszenie próżni w klustronie. Zaobserwowany średni czas między takimi zdarzeniami wyniósł około 12 godzin. Biorąc pod uwagę liczbę klustronów używanych przez XFEL i to, że instalacja ta jest projektowana na 20 lat pracy, system monitorowania i szybkiej reakcji, zaprojektowany przez Autora, może znacząco podnieść niezawodność całego systemu XFEL.

Autor, swój projekt wielokrotnie konfrontował z opiniami specjalistów prezentując jego elementy na 5 międzynarodowych konferencjach poświęconych tematyce akceleratorowej. Całościowy opis zrealizowanego projektu opublikował w *IEEE Transaction on Nuclear Science* w 2017 r.

Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Rozprawa doktorska zredagowana wzorowo. Autorowi udało się zachować równowagę między niezbędnymi dla czytelnika informacjami o charakterze ogólnym, pokazującym otoczenie w jakim był realizowany projekt i opisem zastosowanych rozwiązań. Język

pracy klarowny, narracja dobrze uporządkowana – pracę czyta się z zainteresowaniem. Dobrze dobrane, czytelne ilustracje. Dobrze, w przemyślany sposób dobrana, bibliografia licząca 60 pozycji.

Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Jedyną uwagą jaką mam do redakcji pracy, to brak przedstawienia w jednym miejscu, np. na rysunku, cyklu pracy instalacji XFEL. Bardzo byłoby to cenne dla czytelnika który po raz pierwszy styka się z tym urządzeniem. Informacje o czasie trwania poszczególnych faz czy o ich okresie są rozproszone w tekście pracy i nie jest łatwo złożyć je w całość.

Pomimo dużej staranności redakcyjnej, Autorowi nie udało się uniknąć pewnych drobnych uchybień korekcyjnych. Brakuje objaśnienia niektórych skrótów, np. PMM na rys. 3.1. Zdarzają się pomyłone podpisy (pod rysunkiem 5.24) i opisy linii na rysunkach nieadekwatne do zawartości rysunku (rys. 7.3 i 7.4). Na stronie 39 pojawia się ciepło topnienia miedzi wyrażone w jednostkach gęstości (o wartości 206 kg/m^3)! Jest też w pracy kilka błędnych sformułowań które traktuję jako lapsusy językowe, np. na str. 37 nazwanie naładowania pola elektrycznego gradientem pola elektrycznego czy na str. 15 stwierdzenie, że promieniowanie synchrotronowe jest emitowane gdy cząstki są przyspieszane.

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

Recenzowana rozprawa świadczy o wysokim poziomie kompetencji naukowo-technicznej Autora. Spełnia wymagania, jakie stawia rozprawom doktorskim obowiązująca Ustawa o Tytule i Stopniach Naukowych, z nadmiarem.

Wnioskuje o dopuszczenie Autora do następnych etapów przewodu doktorskiego.

podpis



Warszawa, dnia 5.03.2018 r.

Dr hab. inż. Sławomir Wronka
Profesor nadzwyczajny

Narodowe Centrum Badań Jądrowych
Ul. A.Soltana 7
05-400 Otwock

***KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY
WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ***

Tytuł rozprawy: Protection and Measurement System for High Power RF Tube Amplifiers
Used in Particle Accelerators

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Butkowski

Podstawą recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej z dnia 28 listopada 2017r, oraz pismo Pana Dziekana w tej sprawie z dnia 3.01.2018 r.

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Obszarem badawczym przedstawionej pracy doktorskiej jest rozbudowany system ochronno-pomiarowy opracowywany na potrzeby nowoczesnego źródła promieniowania synchrotronowego E-XFEL. Zlokalizowane w Niemczech urządzenie oparte jest na nadprzewodzącym akceleratorze elektronów. Głównymi elementami zasilania wysokiej częstotliwości akceleratora XFEL są klistrony. Aby zagwarantować ich długą, możliwie bezawaryjną pracę, autor rozprawy zaprojektował i uruchomił system KLM (ang. Klystron Lifetime Management system), nadzorujący pracę klistronów oraz wykrywający w jak najkrótszym czasie zdarzenia mogące uszkodzić te wrażliwe urządzenia. Autor stanął przed

wyzwaniem zaproponowania układów elektronicznych, które będą w stanie w wystarczająco krótkim czasie zareagować tak, aby nie doszło do uszkodzenia klistronu, przy czym warto pamiętać, że chodzi tu o moce impulsowe rzędu MW.

W pierwszej części rozprawy Pan mgr Butkowski wprowadza czytelnika w tematykę synchrotronowych źródeł światła, przechodząc następnie do konkretnego przykładu, jakim jest XFEL. W pracy opisane zostały główne podzespoły akceleratora, w zakresie niezbędnym do zrozumienia przedstawionej tematyki. Autor skupia się przede wszystkim na układach zasilania wysokiej częstotliwości, stacjach RF i systemie LLRF (ang. Low Level RF) akceleratora płynnie przechodząc do przedstawienia celu rozprawy.

Jako główny cel Doktorant wskazuje opracowanie systemu, którego zadaniem jest dokonywanie w trybie rzeczywistym pomiarów parametrów pracy kontrolowanych klistronów oraz szybkie reagowanie na wykryte zjawiska nieprawidłowe zachodzące tak w samych klistronach, jak i w innych elementach akceleratora, mogące mieć jednak niekorzystny wpływ na same lampy. Cel ten został sformułowany jasno i jak wspomniano – jego sformułowanie poprzedzone zostało wyczerpującym wstępem przybliżającym wszystkie aspekty pracy.

Praca ma charakter doświadczalny.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W przedstawionej rozprawie Autor uwzględnił 60 źródeł, zawierających pozycje książkowe, publikacje w czasopiśmie naukowych (w tym konferencyjne), raporty wewnętrzne, odnośniki do stron internetowych oraz inne prace doktorskie. Nazwisko Autora pojawia się przy 8 pozycjach.

Każdy obszar poruszonej w pracy tematyki znalazł swoje umocowanie w przytoczonej literaturze, uwzględniając najnowszą światową wiedzę w wymaganym zakresie. Szczególnie cenna jest analiza przyczyn oraz skutków wyładowań w „ciepłych” miedzianych strukturach przyspieszających, jakie występują m.in. w klistronach.

Stwierdzam zatem, iż wybór źródeł, które stanowią tło realizowanej pracy doktorskiej jest właściwy, świadczący o bardzo dobrej wiedzy Autora w obszarze elektroniki cyfrowej, cyfrowego przetwarzania sygnałów, układów FPGA, jak również podstaw akceleracji cząstek elementarnych i specyfiki struktur przyspieszających. Wnioski z przeprowadzonej analizy źródeł pozwoliły Autorowi na wybór własnej ścieżki realizacji prac.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Przedstawiona przez Autora praca zasada działania systemu KLM opiera się na bieżącym porównywaniu wartości parametrów przewidywanych - obliczanych z modelu oraz mierzonych: sygnały fali padającej i odbitej na wyjściach i wejściu klistronu (amplituda, moc, faza), prąd i wysokie napięcie zasilające klistron, prąd pompy próżniowej i sygnały z fotodiod

wykrywających przebicia. Doktorant przedstawia kilka modeli, a następnie wybiera ten, który najlepiej odwzorowuje pracę klistronu. Należy zauważyć, iż właściwe przewidywanie modelowanych wartości ma istotne znaczenie dla poprawności działania całego układu.

Następnie Autor opisuje sprzętową realizację układu oraz funkcjonalności oprogramowania. Przedstawia szczegóły zastosowanych rozwiązań, integrację z systemem LLRF, zastosowane algorytmy oraz etapy instalacji. Zaprojektowany i wykonany system KLM spełnia postawione wymagania.

Mgr Butkowski na każdym etapie swojej pracy w pełni uzasadnił sposób postępowania.

Uważam, że Autor przyjął prawidłowe założenia do realizacji pracy i rozwiązał postawione zagadnienia stosując właściwe dla przedmiotu badań metody.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy polega na zaprojektowaniu, zbudowaniu i uruchomieniu kompletnego systemu ochronno-pomiarowego KLM (ang. Klystron Lifetime Management system), którego celem jest wykrywanie i w czasie rzeczywistym zdarzeń mogących uszkodzić klistron lub zmniejszyć czas jego bezawaryjnej pracy. Po wykryciu przekroczenia ustalonych progów bezpieczeństwa, system reaguje zabezpieczając klistron w odpowiedni sposób, w zależności od stwierdzonego zdarzenia. KLM jest innowacyjnym opracowaniem, nie występującym dotychczas w układach sterowania akceleratorami.

Samodzielne i oryginalne osiągnięcia autora polegały na: wyborze układów do realizacji sprzętowej, implementacji algorytmów w układzie FPGA, opracowaniu oprogramowania wysokiego poziomu, integracji KLM z LLRF i instalacji na stanowisku testowym klistronów w DESY w 2013r. Doktorant oczywiście uczestniczył również w końcowej instalacji systemu w tunelu akceleratora. Jak podkreśla Autor, najwięcej pracy poświęcił implementacji i optymalizacji zastosowanych algorytmów w układzie FPGA. W pracy pokazano dalsze możliwości rozwoju systemu KLM i zastosowania go w innych ośrodkach akceleratorowych.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową jest aktualna. Potwierdzają to uwzględnione w spisie literatury wystąpienia i prezentacje tematu na poważnych światowych konferencjach. Przede wszystkim zaś system KLM został zweryfikowany w praktyce poprzez zastosowanie w jednym z najnowocześniejszych akceleratorów na świecie.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Rozprawa jest napisana logicznie i przekonująco. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobre wprowadzenie w zagadnienie, w tym rozbudowana analiza właściwości klistronów oraz przyczyn i konsekwencji niekorzystnych zjawisk takich jak wyładowania w falowodach i wewnątrz samej lampy. Autor jasno przekazał cel pracy, sposób wyboru konkretnego

modelu i szczegóły sprzętowej implementacji opracowanych algorytmów. Przedstawienie wyników obejmuje możliwe przykłady zdarzeń oraz właściwą reakcję systemu KLM na ich wystąpienie.

Niestety Doktorant nie uniknął błędów redakcyjnych:

- w pracy występują rysunki i wykresy, do których Autor odwołuje się dopiero w dalszej części tekstu; wprowadza to pewien chaos i czyni rozprawę mniej czytelną,
- w pierwszej części pracy zabrakło podania źródeł kilku rysunków (Fig. 2.6, Fig. 2.7, Fig. 2.9) lub wzorów (2.1),
- Fig. 5.23 – omyłkowo zamieszczono identyczny podpis, jak pod Fig. 5.22.
- niezgodnie z opisem w tekście, na Fig. 5.7 nie występują parametry zmodyfikowanego modelu Rapp, a podpis pod Fig. 5.8 sugeruje, iż przedstawiono na nim współczynniki modelu Rapp, podczas, gdy jest to zmodyfikowany model Rapp.
- Fig. 7.3 oraz Fig. 7.4 zostały zamienione, a opisywana w tekście sytuacja występowania odbić wcz po impulsie nie została zilustrowana.

Uchybienia te nie zacierają jednak przekazu i nie umniejszają wartości pracy. Rozprawę jako całość oceniam bardzo pozytywnie.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Przedstawiona rozprawa nie posiada istotnych merytorycznie słabych stron. Jak wspomniano, napisana jest w logiczny, choć nieco chaotyczny sposób, a główne zastrzeżenia przedstawiane w niniejszej recenzji mają charakter uchybień redakcyjnych. Autor opisał wyczerpująco postawione wymagania, sposób wyboru optymalnego modelu, wykonane układy oraz wyniki testów przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych na stanowisku pomiarowym w DESY.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przydatność rozprawy dla nauk technicznych jest znaczna. Autor zaprojektował i wykonał układy realizujące założony poziom ochrony klustronów - tzw. system KLM, który z powodzeniem pracował na stanowisku testowym ponad 4 lata. Fakt ten stanowi rzeczywistą weryfikację przydatności rozprawy.

W trakcie pisania pracy nie było jeszcze możliwości oceny poprawności działania systemu w rzeczywistym akceleratorze, ale doświadczenia zdobyte podczas testów pozwalają z dużą dozą prawdopodobieństwa przypuszczać, iż system będzie działał prawidłowo. Uważam, że wykonane prace wnoszą istotny wkład w dziedzinę sterowania złożonymi układami akceleratorowymi, typowo zasilanymi z klustronów. Przychyłam się jednocześnie do opinii Autora, iż systemy oparte na idei KLM znajdują szersze zastosowania w kolejnych ośrodkach badawczych.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c/ spełniająca wymagania
- d/ spełniająca wymagania z nadmiarem
- e/ **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie**

Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Takow *Wiel*