

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 29 maja 2018 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 12 czerwca 2018 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Agnieszki Zagoździńskiej-Bochenek

temat: „Identification of Fast Signals from the Upgraded Single Crystal Diamond Detector for the Online Beam Monitoring and Precision Luminosity Measurement for the CMS Experiment at the LHC Accelerator”

promotor – dr hab. inż. Krzysztof Poźniak, prof. Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. inż. Władysław Dąbrowski z Akademii Górniczo-Hutniczej

dr hab. inż. Adam Kisiel, prof. Politechniki Warszawskiej

Obrona odbędzie się w dniu 12 czerwca 2018 r. w sali 229 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 12³⁰.

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

mgr inż. Agnieszka Zagoździńska-Bochenek

Doktorat w jęz. angielskim

Tytuł doktoratu:

Identification of fast signals from the upgraded single crystal diamond detector for the Online Beam Monitoring and Precision Luminosity Measurement for the CMS experiment at the LHC accelerator

Streszczenie

Wielki Zderzacz Hadronów (z ang. Large Hadron Collider – LHC) znajdujący się w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN, usytuowany w pobliżu Genewy w Szwajcarii. Jest to obecnie największy na świecie synchrotron o obwodzie około 27km, umożliwiający zderzenia przeciwbieżnych wiązek protonów i ciężkich jonów z częstotliwością 40.08 MHz. Energia zderzeń w układzie środka masy sięgająca 14TeV i świetlność rzędu $10^{34} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ pozwoli na weryfikację istniejących obecnie teorii fizycznych, poznawanie coraz mniejszych struktur materii oraz poszukiwanie nowych cząstek i zjawisk fizycznych. Wspomniane parametry czynią LHC unikalnym przyrządem do badań podstawowych na całym świecie. Aby wykorzystać potencjał naukowy dawany przez LHC zbudowano nadzwyczaj złożone i czułe detektory cząstek. Wieloletnie studia i prace nad budową detektorów doprowadziły do eksperymentalnego potwierdzenia teorii bozonu Higgosa. Obecnie przed LHC stawiane są nowe wyzwania pociągające za sobą konieczność ulepszania parametrów akceleratora. Równocześnie niezbędne jest rozwijanie dotychczasowych oraz opracowanie nowych, jeszcze bardziej precyzyjnych systemów detekcji cząstek. Eksperymenty LHC muszą być zdolne do wyzwalania akwizycji, selekcjonowania, zbierania i przechowywania użytecznych danych spośród wielkiej ilości zbędnych sygnałów generowanych przez poszczególne kanały detektorów. Poszukiwanie bardzo rzadkich zjawisk fizycznych wymaga zbierania niezwykle dużej liczby niezależnych wyników pomiarowych. Mierzone sygnały posiadają często bardzo małą amplitudę w stosunku do szumu, a ich separacja jest niezwykle istotna. Jednym z najważniejszych parametrów akceleratora jest świetlność, charakteryzująca prawdopodobieństwo zderzenia się cząstek w wiązkach przeciwbieżnych. Zwiększanie świetlności skutkuje większą ilością kolizji. Aby przekształcić liczbę zarejestrowanych zdarzeń danego procesu na wielkość wykorzystywaną w fizyce, zwaną przekrojem czynnym, niezbędny jest dokładny pomiar świetlności. Urządzenia do pomiaru świetlności oraz monitorowania pozycji wiązki w LHC są ulokowane w różnych miejscach wokół akceleratora, a także w różnych punktach eksperymentów. Dostarczają one istotnych wielkości mierzalnych dla eksperymentów poszukujących tak zwanej nowej fizyki. W tej pracy przedstawiono szczegóły dotyczące niektórych systemów monitoringu wiązki i urządzeń do pomiaru świetlności dwóch największych eksperymentów LHC: *A Toroidal LHC Aparatus* (ATLAS) i *Compact Muon Solenoid* (CMS). W szczególności omówiono detektor *Fast Beam Conditions Monitor* (BCM1F) zainstalowany w eksperymencie CMS, rozwijany jako część projektu *Beam Radiation, Instrumentation and Luminosity*, w skrócie BRIL. Na podstawie doświadczeń zebranych w poprzednich latach pracy detektora oraz przyszłych wymagań technicznych, Autorka opracowała nowy model przetwarzania danych dla systemu BCM1F oraz zdefiniowała tezę pracy. W oparciu o ten model, wykorzystując dostępne na rynku rozwiązania technologiczne, z uwzględnieniem rekomendacji dla architektur systemów odczytowych realizowanych w eksperymencie CMS, Autorka zaproponowała, zrealizowała oraz uruchomiła nowy system akwizycji danych. W pierwszym etapie zrealizowany system elektroniczny, zaprezentowany w tej tezie, został wykorzystany do zebrania nieprzetworzonych danych z detektora. Używając danych eksperymentalnych, a także

pomocniczo, danych zebranych w warunkach laboratoryjnych, Autorka przeanalizowała właściwości systemu pod względem metrologicznym oraz, na podstawie przedstawionego uprzednio modelu, zaproponowała adaptacyjny algorytm przetwarzania danych w czasie rzeczywistym implementowalny w układach FPGA. Autorka przeprowadziła analizę działania algorytmu korzystając ze skryptów opracowanych przez siebie w programie Matlab, a także w języku Python z wykorzystaniem biblioteki Pandas przeznaczonej do efektywnej analizy dużych zbiorów danych. Analiza danych pozwoliła wykazać, że z wykorzystaniem zaproponowanej metody możliwy jest pomiar pojedynczych oraz nachodzących na siebie impulsów. W kolejnym etapie Autorka zaimplementowała algorytm dla zbudowanego uprzednio systemu. Szczegóły implementacyjne oraz uzyskane wyniki są omówione w ostatniej części pracy. Właściwości zrealizowanego systemu są porównane z parametrami systemu poprzedniej generacji. Ostatecznie Autorka dokonuje porównania cech nowego systemu bez zaimplementowanego algorytmu, z częściową implementacją używaną obecnie w eksperymencie, a także z pełną implementacją algorytmu. To zestawienie pokazuje polepszenie jakości pomiaru w stosunku do dotychczasowych metod, a także możliwości jakie daje zastosowanie nowej metody pomiaru w eksperymencie BCM1F.

Słowa kluczowe: CERN, LHC, CMS, BRIL, BCM1F, FPGA, MicroTCA, przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym, system akwizycji danych, metrologia, detektory diamentowe.

Kraków, 14 maja 2018

Prof. dr hab. inż. Władysław Dąbrowski
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

**Tytuł rozprawy: Identification of Fast Signals from the Upgraded Single Crystal
Diamond Detector for the Online Beam Monitoring and Precision
Luminosity Measurement for the CMS experiment at the LHC
Accelerator**

Autor rozprawy: mgr inż. Agnieszka Anna Zagoździńska-Bochenek

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Agnieszkę Zagoździńską-Bochenek dotyczy opracowania cyfrowej części elektroniki odczytu detektora BCM1F (Fast Beam Condition Monitor) w eksperymencie CMS przy akceleratorze LHC w CERN. Detektor BCM1F jest jednym z kilku detektorów wykorzystywanych w systemie monitorowania wiązki, pełniąc istotną rolę w systemie bezpieczeństwa eksperymentu i pomiarze świetlności w detektorze CMS. Zasadniczą funkcją detektora BCM1F jest zliczanie cząstek pochodzących ze zderzeń paczek protonów w akceleratorze LHC, zachodzących co 25 ns, i niezależnie zliczeń cząstek, które pochodzą z oddziaływań protonów z resztkami gazu w rurze akceleratora i z oddziaływań produktów zderzeń z materiałami konstrukcyjnymi. Cząstki te pojawiają się w detektorze BCM1F asynchronicznie względem cząstek pochodzących ze zderzeń paczek protonów i stanowią tło dla zasadniczych cząstek będących produktami zderzeń wiązek protonowych..

Idea pomiaru jest oparta na metodzie czasu przelotu, przy czym położenie modułów detektora BCM1F po dwóch stronach punktu zderzenia jest tak dobrane, żeby cząstki pochodzące ze zderzeń paczek protonów docierały do przeciwnych modułów w odstępach 12 ns, czyli w przybliżeniu w połowie odstępów czasowych pomiędzy kolejnymi paczkami wiązek protonowych. Wykorzystanie metody czasu przelotu wymaga odpowiedniej rozdzielczości czasowej rejestrowanych sygnałów, która zależy zarówno od szybkości odpowiedzi sensora, jak również od elektroniki odczytu. W detektorze BCM1F wykorzystano stałościowe komory jonizacyjne oparte na syntetycznym diamentcie, przede wszystkim ze względu na ich odporność na uszkodzenia radiacyjne. Sensory diamentowe są obecnie powszechnie stosowane w eksperymentach fizyki cząstek elementarnych w obszarach narażonych na ekstremalne dawki promieniowania osiągające poziom MGy. Czasy zbierania ładunku w typowym detektorze diamentowym o grubości 500 μm są na poziomie pojedynczych nanosekund, zależnie od napięcia polaryzacji, a więc zapewniają wymaganą rozdzielczość czasową.

W przypadku detektora BCM1F rozdzielczość czasowa całego toru sygnałowego jest ograniczona przez układ elektroniki front-end oparty na specjalizowanym układzie scalonym. Kształt, czas narastania i czas rozdzielczy impulsów dostarczanych przez ten układ jest wynikiem kompromisu między szybkością odpowiedzi i stosunkiem sygnału do szumu. Ładunek generowany w detektorze diamentowym przez pojedynczą cząstkę minimalnie jonizującą wynosi ok. 2 fC (12500 elektronów) i uzyskanie przyzwoitego stosunku sygnału do

szumu, na poziomie 20, wymaga ograniczenia pasma przenoszeniu układu kształtującego. Wypadkową funkcję przenoszenia układu front-end można przybliżyć transmitancją wzmacniacza trans-impedancyjnego i filtra dolnoprzepustowego drugiego rzędu. W rezultacie otrzymujemy odpowiedzi w postaci impulsów kwazi-gausowskich o szerokości połówkowej na poziomie 9 ns. Takie kształtowanie impulsów w układzie front-end prowadzi do spiętrzania impulsów pochodzących od produktów zderzeń wiązek protonowych i impulsów tła, bez możliwości prostej dyskryminacji i pomiaru czasu. W związku z tym eksperyment CMS przyjął koncepcję pomiarową opartą na ciągłym szybkim próbkowaniu rejestrowanych impulsów i analizie (filtracji) w domenie cyfrowej.

Zadaniem doktorantki było opracowanie metody analizy rejestrowanych impulsów umożliwiającej w czasie rzeczywistym identyfikację i pomiar amplitud impulsów pochodzących od cząstek produkowanych w zderzeniach wiązek protonowych i impulsów pochodzących od tła. Cel pracy został jasno i szczegółowo sformułowany w rozdziale 4. Samodzielne prace doktorantki obejmowały zarówno opracowanie algorytmów, jak również implementację sprzętową w oparciu o nowe elementy systemu akwizycji danych (przetworniki analogowo-cyfrowe) i nowe układy FPGA.

Pierwsze trzy rozdziały rozprawy zawierają bardzo zwięzły opis akceleratora LHC, eksperymentu CMS oraz wprowadzenie do zagadnień związanych z pomiarem świetlności i tła promieniowania w obszarze zderzeń wiązek protonowych. Rozdział 3 zawiera opis koncepcji detektora BCM1F, sensorów diamentowych oraz elektroniki front-end. Autorka przedstawiła wszystkie istotne informacje, które stanowiły punkt wyjścia do jej pracy.

W informacjach dotyczących detektorów diamentowych pojawia się jednak niespójność w założeniu dotyczącym wielkości sygnału dostępnego z tych detektorów. Rysunek 3.2 pokazuje typową wydajność zbierania ładunku w detektorze na poziomie 80%, co przy założeniu grubości detektora równej 500 μm i liniowej gęstości ładunku generowanego przez cząstkę minimalnie jonizującą równej 35 par elektron-dziura na 1 μm , daje ładunek 14400 elektronów, czyli 2.3 fC. Dwie strony dalej oraz w dalszej części pracy, w szczególności w rozdziale 6, autorka przyjmuje 3 fC jako ładunek generowany przez cząstkę minimalnie jonizującą. W omówieniu sygnałów generowanych w detektorach ładunkowych zabrakło również istotnej informacji dotyczącej fluktuacji wielkości generowanego ładunku. Wielkość ładunku generowanego w detektorze podlega rozkładowi Landaua, a wymienione powyżej liczby 2.3 fC i 3 fC dotyczą wartości najbardziej prawdopodobnej, podczas gdy dolna granica rozkładu jest na poziomie 50% wartości najbardziej prawdopodobnej, a górny ogon rozkładu rozciąga się do 3 wartości najbardziej prawdopodobnych. Liczby te są istotne dla określenia wymagań elektroniki front-end odnośnie minimalnego mierzalnego ładunku i zakresu liniowego. Z punktu widzenia doktorantki i celów postawionych w rozprawie elektronika front-end jest zadana, natomiast można by oczekiwać komentarza, na ile parametry tej elektroniki są adekwatne do wymagań detektora BCM1F.

Kolejnym aspektem, który powinien być wzięty pod uwagę przy omówieniu koncepcji i wymagań dla detektora BCM1F są uszkodzenia radiacyjne. Detektory diamentowe zostały wybrane do tego zastosowania ze względu na odporność na uszkodzenia radiacyjne, znacznie lepszą niż np. szeroko dostępne detektory krzemowe. Nie oznacza to jednak, że detektory diamentowe nie podlegają uszkodzeniom radiacyjnym, a jedynie tyle, że wytrzymują odpowiednio wyższe dawki. Zasadniczym efektem radiacyjnym w detektorach diamentowych jest pułapkowanie generowanego w detektorze ładunku, co prowadzi zarówno do redukcji wielkości sygnału generowanego przez naładowane cząstki, jak również do wydłużenia czasu zbierania ładunku. Przykładowo, po naświetleniu relatywistycznymi protonami do fluencji

1×10^{16} p/cm², zbierany ładunek spada do poziomu 50% wartości początkowej. Literatura dotycząca uszkodzeń radiacyjnych w detektorach diamentowych jest bardzo obszerna i można łatwo znaleźć dane eksperymentalne odpowiadające dawkom promieniowania, na jakie będzie narażony zmodernizowany detektor BCM1F. Autorka kilkakrotnie sygnalizuje problem uszkodzeń radiacyjnych w sensorach diamentowych i w elektronice front-end, ale bez ilościowego oszacowania skutków tych uszkodzeń dla proponowanych algorytmów analizy rejestrowanych sygnałów.

Rozdział 5 zawiera zwięzły opis nowego systemu akwizycji danych dla detektora BCM1F opartego na systemie MicroTCA – standardu przyjętego w CERN dla modernizowanych detektorów. Poszczególne moduły tego systemu są rozwijane w ramach współpracy CMS, natomiast zadaniem doktorantki było uruchomienie specyficznej konfiguracji dla potrzeb detektora BCM1F. Zasadnicze samodzielnie wykonane przez doktorantkę zadania dotyczyły opracowania algorytmów filtracji i ich implementacji sprzętowej. Wyniki tych prac zostały przedstawione w rozdziałach 6 i 7.

Wobec wymagania, aby rejestrowane sygnały były analizowane i filtrowane w czasie rzeczywistym, algorytmy analizy muszą być kompatybilne z możliwościami obliczeniowymi układów FPGA. Czas pomiędzy zderzeniami wiązek protonowych w akceleratorze LHC wynosi 25 ns i ten okres zasadniczo wyznacza wymaganą szybkość przetwarzania. Spełnienie tego wymagania jest możliwe przy zastosowaniu wydajnych algorytmów wykorzystujących buforowanie danych i przetwarzanie równoległe.

Podstawę do opracowania algorytmu identyfikacji sygnałów z detektora BCM1F stanowił oczekiwany kształt impulsów z elektroniki front-end, pomiary układu elektroniki front-end przy wykorzystaniu elektronicznych impulsów testowych oraz dane zebrane w czasie pracy akceleratora LHC. Oczekiwany kształt sygnałów z elektroniki front-end wynika z funkcji przenoszenia tego układu i jest opisany wzorem (6.3), który został wykorzystany do generacji impulsów testowych. Przy opisie układu front-end doktorantka przywołuje książkę Spielera „Semiconductor Detector Systems”, która jednak nie opisuje struktury wykorzystanej w używanym przez nią układzie front-end. Doktorantka wymienia również pomiary wykonane ze źródłem cząstek β ze źródła radioaktywnego Sr-90, ale nie pokazuje przykładów takich pomiarów. Straty jonizacyjne cząstek β o energii 2.28 MeV w diamentach są bardzo zbliżone do strat jonizacyjnych cząstek minimalnie jonizujących i cząstki te są często wykorzystywane do laboratoryjnych testów detektorów. Zasadnicza różnica w stosunku do testów akceleratorowych leży w rozkładach czasowych rejestrowanych cząstek. W przypadku źródła radioaktywnego sygnały pojawiają się przypadkowo w czasie z rozkładem Poissona, natomiast w przypadku akceleratora LHC synchronicznie z głównym zegarem LHC. Przy wykorzystaniu cząstek β ze źródła radioaktywnego wykorzystywany jest zwykle dodatkowy detektor scyntylacyjny, który generuje sygnał wyzwalania, ale w pracy nie znalazłem żadnej informacji na ten temat.

Sygnały z elektroniki front-end są próbkowane z częstością 250 MS/s w obecnym systemie akwizycji danych opartym na VME i z częstością 640 MS/s lub 1.28 GS/s w nowym systemie opartym na standardzie MicroTCA. Przy tak dużych częstościach próbkowania kształt rejestrowanego sygnału jest również uzależniony od fluktuacji czasowych sygnałów próbkujących. Doktorantka wykonała pomiary sygnałów i oszacowała zakres fluktuacji sygnałów wyzwalających, które następnie wykorzystwała przy tworzeniu algorytmu identyfikacji sygnałów i znajdowania maksimum sygnałów. Na podkreślenie zasługuje opanowanie przez doktorantkę techniki trudnych pomiarów czasowych w zakresie sub-nanosekundowym.

Nowatorskim pomysłem w opracowanym algorytmie jest wprowadzenie biblioteki impulsów referencyjnych utworzonej w oparciu o zebrane dane i analizę off-line. Analiza off-line nie jest ograniczona zasobami obliczeniowymi układów FPGA i czasem obliczeń, można więc zastosować bardziej złożone algorytmy analizy kształtów rejestrowanych sygnałów. Doktorantka pokazała, że przy wykorzystaniu biblioteki impulsów referencyjnych możliwe jest dekompozycja impulsów będących wynikiem spiętrzenia impulsów pojawiających się w odstępie czasowym mniejszym niż czas rozdzielczy elektroniki front-end. Opracowany algorytm umożliwia separację i histogramowanie w czasie rzeczywistym impulsów pochodzących od zderzeń cząstek protonowych i impulsów tła. Oczywiście efektywność algorytmu zależy od odstępu czasowego pomiędzy spiętrzonymi impulsami i od stosunku sygnału do szumu zdeterminowanego przez parametry układu elektroniki front-end.

Oprogramowanie sprzętowe realizujące diskutowane zaproponowane algorytmy w układach FPGA zostało opisane w rozdziale 7. Ostateczną weryfikacją efektywności tego oprogramowania są przedstawione na końcu tego rozdziału wyniki testów laboratoryjnych, jak również po włączeniu opracowanych modułów do systemu akwizycji danych detektora BCM1F.

Wyniki testów algorytmu dla różnych poziomów szumów i sygnałów są przedstawione w rozdziałach 6.6 i 6.7, ale interpretacja przedstawionych wyników nie jest bynajmniej łatwa. Po pierwsze, w tabelach 6.6 i 6.7 mamy sygnał wejściowy zdefiniowany jako ładunek w [fC], sygnał wyjściowy w liczbie jednostek ADC (zgaduję, bo nie zostało to jasno powiedziane) i szum w [mV]. Przy takim zestawieniu nie sposób określić, jakim wartościom stosunku sygnału do szumu odpowiadają poszczególne pozycje w tabelach i na wykresach. Mamy tutaj trzy możliwości: (1) szum w jednostkach ekwiwalentnego ładunku szumowego (ENC) dodanego do sygnału wejściowego, (2) podać szum w liczbie jednostek ADC, jeżeli szum jest dodawany do sygnału wyjściowego, (3) podać amplitudę sygnału wyjściowego w [mV]. W odniesieniu do szumów mamy jeszcze dwa parametry, które czytelnik musi sobie domyślnie założyć, a mianowicie: rozkład statystyczny dodawanego szumu i jego poziom. Zakładam domyślnie, że szum jest określony na poziomie jednego odchylenia standardowego rozkładu gaussowskiego. Wtedy jednostka szumu powinna być zdefiniowana jako [mV rms]. W dziedzinie fizyki cząstek operowanie stosunkiem sygnału do szumu na poziomie jednego odchylenia standardowego jest powszechne, ale np. w tradycyjnej spektrometrii rozdzielczość jest definiowana na poziomie szerokości połówkowej rozkładu gaussowskiego. Interpretacji prezentowanych wyników nie ułatwia fakt, że dla impulsów uzyskanych z pomiarów kalibracyjnych przedstawionych na rys. 6.13 sygnał wejściowy jest zdefiniowany w [mV]. Znowu należy się domyślić, że są to amplitudy sygnałów testowych, które można przeliczyć na ładunki wejściowe, jeżeli znamy wartości pojemności testowej w układzie elektroniki front-end. Nie znalazłem tej wartości w pracy, chociaż w referencji [71] można znaleźć wartość 60 fC. Oznacza to, że najmniejszy sygnał przedstawiony na rys. 6.13 odpowiada ładunkowi wejściowemu 3 fC, a największy ładunkowi 15 fC.

Jest oczywiste, że poniżej pewnego poziomu stosunku sygnału do szumu żadna metoda filtracji nie da miarodajnych wyników. Dlatego też testy opracowanych algorytmów należałoby ograniczyć do zakresu jaki można osiągnąć w detektorze BCM1F. Biorąc pod uwagę zakres ENC dla elektroniki front-end na poziomie 400 – 800 elektronów rms (Tabela 3.1) i zakładając minimalny sygnał wejściowy na poziomie 1 fC, otrzymujemy dolny zakres stosunku sygnału do szumu na poziomie 7.8, chyba że stosunek sygnału do szumu jest zdegradowany w dalszych stopniach toru pomiarowego. Rozważanie przypadków ze stosunkiem sygnału do szumu na poziomie 1 dB nie ma sensu, chyba że stosunek sygnału do szumu jest zdefiniowany inaczej niż domyślnie. Uwaga, że poziom szumu w detektorze BCM1F jest poniżej 5 jednostek ADC też nie niesie absolutnie żadnej informacji, ponieważ

nie znamy współczynnika konwersji ładunku wejściowego na jednostkę ADC, a ponadto nie jest jasne jak określony jest poziom szumu, jedno odchylenie standardowe, czy np. trzy odchylenia standardowe, czy też na podstawie jakościowej obserwacji, że częstość zliczeń szumowych powyżej tego poziomu jest zanedbywalnie mała w porównaniu z częstością sygnałów.

Podsumowując przedstawione wyniki, można uznać, że doktorantka zademonstrowała skuteczność zaproponowanych algorytmów i wskazała poprawnie ich ograniczenia, natomiast nie pokazała jednoznacznie, jak te wyniki przekładają się na warunki pracy detektora BCM1F. Jeżeli założyć, że dominują przypadki z pojedynczą cząstką rejestrowaną w elemencie detektora w każdym zderzeniu, znakomita większość mierzonych impulsów będzie odpowiadać ładunkom wejściowym z zakresu 2 do 3 fC. Interesującym wynikiem jest przykład dekompozycji spiętrzonych impulsów ale skuteczność tej metody będzie zależna od amplitud spiętrzonych sygnałów, ich odstepu w czasie oraz od poziomu szumów.

Praca jest napisana w języku angielskim na przyzwoitym poziomie. Nawet, jeżeli można by mieć zastrzeżenia do językowej poprawności niektórych sformułowań, przekaz jest na ogół zrozumiały. Lista akronimów umieszczona na początku jest pomocna, aczkolwiek ich liczność nie ułatwia czytania rozprawy. Oczywistym niedociągnięciem jest wspomniany wcześniej brak współczynników konwersji pomiędzy różnymi jednostkami używanymi na różnych wykresach. Typowym przykładem są znajdujące się obok siebie rysunki 6.13 i 6.14. Na rysunku 6.13 mamy czas w sekundach i amplitudę w miliwoltach, a na rysunku 6.14 czas w liczbie próbek i amplitudę w jednostkach ADC, i nie wiadomo, jakim ładunkom wejściowym odpowiadają przedstawione impulsy. Na rysunkach 6.17, 6.19 i 6.20 pojawia się poważny błąd edytorski, który nie powinien być przepuszczony przy starannym czytaniu manuskryptu, a mianowicie oś czasu opisana jako „input charge * 1e2 [fC]”.

Literatura cytowana przez doktorantkę jest obszerna i kompletna. W wykazie literatury znajduje się wiele odniesień do materiałów firmowych związanych z wykorzystywaną aparaturą oraz do raportów wewnętrznych. Przy pewnym wysiłku można te materiały odszukać w Internecie, ale byłoby bardzo pomocne, gdyby w spisie literatury znalazły się łącza do odpowiednich stron WWW. Wykaz literatury zawiera kilka publikacji, w których doktoranta jest pierwszym autorem lub współautorem, co jednoznacznie wskazuje na znaczący jej wkład do projektu realizowanego przez większy zespół w ramach współpracy CMS, którego ramy czasowe wykraczają poza ramy czasowe studiów doktoranckich.

Podsumowując moją recenzję, stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Zagoździńską-Bochenek zatytułowana „Identification of Fast Signals from the Upgraded Single Crystal Diamond Detector for the Online Beam Monitoring and Precision Luminosity Measurement for the CMS Experiment at the LHC Accelerator” spełnia wymagania formalne przepisów o rozprawach doktorskich zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 – Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595 – z późniejszymi zmianami, oraz wymagania zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim, i wnioskuję o dopuszczenie doktorantki do publicznej obrony rozprawy.

Wtedy ciał Dobroci!

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

Tytuł rozprawy: Identification of Fast Signals from the Upgraded Single Crystal Diamond Detector for the Online Beam Monitoring and Precision Luminosity Measurement for the CMS Experiment at the LHC Accelerator

Autorka rozprawy: mgr inż. Agnieszka Zagoździńska-Bochenek

- 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)?**

Rozprawa mgr inż. Agnieszki Zagoździńskiej-Bochenek dotyczy elektronicznego systemu wyzwalania i akwizycji danych dla detektora świetlności opartego o czujniki diamentowe, będącego częścią eksperymentu Compact Muon Solenoid (CMS) przeprowadzanego w kompleksie Wielkiego Zderzacza Hadronów (LHC) w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN. Recenzowana praca dotyczy ulepszenia systemu akwizycji i przetwarzania danych dla detektora BCM1F i włączenie nowej wersji do kompleksowego systemu zbierania danych CMS. Jest więc to praca o charakterze wyraźnie eksperymentalnym, chociaż została poprzedzona adekwatną analizą teoretyczną możliwych do zastosowania rozwiązań.

W rozprawie została jasno i wyraźnie postawiona teza, mówiąca o możliwości opracowania i wdrożenia nowej metody obróbki sygnału, dającej jakościowo nowe możliwości w porównaniu do wcześniej działających systemów. W szczególności zaproponowano metody analizy danych o rozdzielczości czasowej pozwalającej na odróżnienie sygnałów pochodzących od zderzeń właściwych, zderzeń tła oraz produktów aktywacji. Dodatkowo procedura powinna pozwalać na separację sygnałów pochodzących od różnych cząstek, a nakładających się na siebie w dziedzinie czasu z dodatkowym zastrzeżeniem, że sygnały te mogą mieć znacząco różne amplitudy. Całość algorytmu została przystosowana do wybranego detektora, to jest urządzenia BCM1F, które oparte jest o czujniki diamentowe pracujące jako półprzewodnikowe detektory promieniowania jonizującego. Tak postawiona teza pozwala w zadowalający sposób ocenić dalszą część rozprawy, w tym na stwierdzenie, czy postawiona teza została udowodniona.

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

Celem pracy było opracowanie nowego ciągu akwizycji i obróbki danych z detektora BCM1F, działającego w ramach większej całości to jest systemu Beam Radiation, Instrumentation and Luminosity (BRIL), części składowej eksperymentu CMS. Rozprawa rozpoczyna się wprowadzeniem do problematyki pomiaru świetlności („luminosity”), w więc wymogów stawianych przez problematykę fizyczną eksperymentu CMS oraz sposobem działania akceleratora LHC, w tym konstrukcji wiązki z elementów zwanych „bunches” oraz ich współzależności

czasowych. Następnie opisuje środowisko pomiarowe eksperymentu CMS i miejsce detektora BCM1F w tym systemie. Wprowadzenie to jasno pokazuje, że Autorka jest świadoma tego, skąd biorą się wymagania stawiane przed opracowywanymi przez nią systemami i rozumie ich konsekwencje. Ta część rozprawy prezentuje ilość informacji wystarczającą do zrozumienia dalszych części rozprawy.

Rozwiązanie prezentowane w rozprawie jest nową wersją systemu, który działa w sposób produkcyjny od kilku lat w eksperymencie CMS. W oczywisty sposób autorka musiała zapoznać się szczegółowo z istniejącym rozwiązaniem, aby skorzystać z doświadczeń zgromadzonych w dotychczasowej eksploatacji systemu. Rozprawa dowodzi, że z tego zadania wywiązała się zadowolająco. Dodatkowo rozwiązanie musi wpisywać się w narzucony z góry przez eksperyment CMS system dystrybucji sygnałów czasowych oraz standardy elektryczne i elektroniczne systemu akwizycji danych oraz logiczne standardy transmisji danych. Tu również Autorka wykazuje się znaczną specjalistyczną wiedzą ekspercką i wyraźnie widać że jest świadoma wszelkich konsekwencji tych wymogów. Analiza teoretyczna nie ogranicza się jednak tylko do analizy stanu zastanego. W rozwiązaniu zaproponowanym przez Autorkę stosowane są jakościowo nowe elementy, które nie były obecne w poprzedniej wersji systemu, a szczególnie ścieżka przetwarzania danych oparta o znacznie nowsze układy FPGA, które pozwoliły na wprowadzenie algorytmów o istotnych nowych funkcjonalnościach takich jak identyfikacja nakładających się impulsów. Innym nowym rozwiązaniem była zastosowanie standardu MicroTCA do budowy systemu. Pokazuje to, że Autorka w twórczy sposób wykorzystwała analizę źródeł i na ich podstawie zaproponowała autorskie rozwiązania. Oprócz tego ze wszystkich rozdziałów tekstu przebija dogłębna wiedza Autorki w tematyce systemów akwizycji danych, wynikająca zapewne w dużej mierze z jej bezpośredniego udziału w podobnych pracach oraz pracy w laboratorium CERN, gdzie podobne badanie prowadzone są na najwyższych światowym poziomie.

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

Zadania sformułowane przez Autorkę w postaci tezy pracy zostały wykonane. Zostało to potwierdzone na kilka sposobów. Po pierwsze system zaproponowany w pracy został wykonany, zainstalowany i uruchomiony w systemie produkcyjnym, co jest bardzo istotną zaletą pracy. Należy podkreślić, że system jest jednym z kluczowych w działaniu detektora CMS, inaczej mówiąc od jego właściwego działania zależy poprawność wyników fizycznych uzyskiwanych przy pomocy zestawu detektorów, których koszt wynosi kilkaset milionów franków szwajcarskich. Stąd każdy element wdrażany do działania w CMS przechodzi szereg testów wykonywanych przez niezależnych ekspertów. Fakt, że system opracowany w ramach rozprawy przeszedł te testy jest bardzo mocnym dowodem na jego poprawne działanie. Niezależnie od tego autorka opisała w rozdziale 6 rozprawy szerokie spektrum testów programistycznych, którym poddała swoje rozwiązanie, w tym wydajność rejestracji, odporność procedury na zaburzenia wynikające z szumów i niepewności pomiarów, oraz poprawność otrzymanych wyników od strony fizycznej. Testy wykazały, że system działa w zgodzie ze specyfikacjami zdefiniowanymi przez eksperyment CMS, to jest spełnia zadanie pomiaru świetlności oraz pozwala na rozróżnienie sygnałów pochodzących od wiązki, od oddziaływań tła oraz od wzbudzeń aktywacyjnych. Wykazano również, że użycie architektury MicroTCA, odpowiedni wybór układu Virtex-6 Xilinx oraz optymalizacja firmware układu FPGA dało wystarczającą rozdzielczość czasową oraz przepustowość dla transmisji danych. Nie bez znaczenia jest też znacznie większa niż w poprzednim rozwiązaniu elastyczność układu i jego zdolność do dostosowywania się do zmieniających się warunków działania i pomiarów w sposób automatyczny, z minimalną potrzebą ingerencji operatora.

Podsumowując Autorka wykazała poza wszelką wątpliwość właściwy wybór narzędzi. Na podkreślenie zasługuje fakt, że opracowany system jest uruchomiony w środowisku produkcyjnym, gdzie jego działanie jest na bieżąco monitorowane przez szeroki zespół ekspertów.

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.

Rozprawa opisuje rozwiązanie konkretnego zadania, t.j. stworzenie nowego modelu przetwarzania danych dla detektora BCM1F. Jako że detektor ten jest unikalnym systemem pomiarowym, rozwiązanie to siłą rzeczy jest oryginalne. Jednocześnie wykorzystuje ono istniejące rozwiązania, takie jak standard MicroTCA, oraz jest włączone w system akwizycji danych i dystrybucji sygnałów zegarowych eksperymentu CMS, co sprawia że wpisuje się ono naturalnie w istniejący stan wiedzy oraz rozwiązań. Dzięki takiemu wyborowi, Autorka mogła skupić się na rozwiązaniu nowych, unikalnych problemów specyficznych tylko dla tej rozprawy (takich jak opracowanie metody szybkiego wykrywania pojawienia się sygnału oraz metody odzyskiwania sygnałów nakładających się). Prace te wpisują się w trend opisany w istniejącej światowej literaturze, jednak zostały one przetestowane w rzeczywistych warunkach.

Oryginalny wkład Autorki polega na zaproponowaniu nowego modelu przetwarzania danych, a następnie na jego implementacji, przetestowaniu, wdrożeniu i monitorowaniu jego działania w warunkach produkcyjnych. Wkład Autorki potwierdzony jest tym, że jest ona współautorem publikacji [70] w czasopiśmie Nuclear Instruments and Methods, głównym autorem 5 publikacji pokonferencyjnych oraz współautorką 3 innych referatów pokonferencyjnych. Świadczy to o tym, że była ważnym członkiem zespołu opracowującego detektor BCM1F. Należy podkreślić, że w eksperymentach przeprowadzanych w CERN praca w dużych zespołach badawczych jest nieunikniona, a Autorka wykazała się umiejętnością pracy w dużej grupie składającej się ze światowej klasy specjalistów. Jest to też gwarancją światowego poziomu opracowanych rozwiązań.

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

Rozprawa jest przygotowana w języku angielskim, co jest wymagane w przypadku pracy wykonywanej w dużej kolaboracji naukowej. Składa się z 7 rozdziałów, odpowiednio pogrupowanych logicznie. Rozpoczyna się od wstępu i skrótego przedstawienia problematyki akceleratora LHC oraz eksperymentu CMS i jego podsystemu pomiaru świetlności. Następnie opisane jest dokładnie zagadnienie pomiaru świetlności i jego kluczowe znaczenie dla badań fizycznych. Opisane są też systemy stosowane do pomiaru świetlności. W kolejnym rozdziale znajduje się szczegółowy opis detektora BCM1F, jego elektroniki oraz firmware'u oraz oprogramowania do analizy danych. Kolejny rozdział poświęcony jest precyzyjnemu zdefiniowaniu tezy pracy, wraz z założeniami i wymaganiami stawianymi przed systemem. W rozdziale 5 podany jest opis nowej elektroniki opartej o standard MicroTCA. W kolejnym rozdziale rozpoczyna się opis prac w których Autorka miała kluczowy wkład. Przedstawiony jest algorytm identyfikacji sygnałów z detektora BCM1F w dwóch aspektach – to znaczy szybkiego dostarczenia informacji o tym, że sygnał został wykryty oraz algorytmu separacji sygnałów pokrywających się. W ostatnim rozdziale opisano implementację zaproponowanego systemu w układzie FPGA oraz ostateczną analizę danych. Rozprawa kończy się syntetycznym zbiorem wniosków. Podsumowując układ rozprawy jest przemyślany i pozwala czytelnikowi na naturalne zapoznawanie się z logicznie po sobie następującymi etapami pracy. Wszystkie potrzebne pojęcia są wyjaśnione, niezwykle pomocny okazuje się tu wykaz akronimów użytych w tekście. Rozprawa jest zilustrowana starannie wybranymi i przygotowanymi rysunkami, często znacząco ułatwiającymi zrozumienie wzajemnych wielopoziomowych powiązań pomiędzy systemami. Redakcja tekstu również jest na zadowalającym poziomie.

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

Rozprawa przedstawia opracowanie systemu akwizycji danych dla jednego z kilku rodzajów detektorów świetlności używanych w detektorze CMS. Opisano szereg testów, którym poddano system, w tym testów na prawdziwych danych w warunkach produkcyjnych. Nie ma wątpliwości, że system spełnia zadania od strony elektronicznej. Zabrakło jednak chociaż skrótowego stwierdzenia, czy otrzymane wyniki okazały się zadowalające od strony fizycznej. Szczególnie ciekawe byłoby porównanie wyników otrzymanych w rozprawie z pomiarami świetlności otrzymywanymi przez zupełnie niezależne, oparte o inne zjawiska fizyczne, detektory (np. detektory BPTX, BHM, czy BCM).

Autorka podjęła duży trud, aby możliwie dokładnie przetestować zaproponowane rozwiązania, jednak w wielu przypadkach musiała się ograniczyć jedynie do symulacji komputerowych. Szkoda, że ze względów na ramy czasowe w rozprawie nie udało się zawrzeć wyników testów pełnej wersji algorytmu, pozwalającej na separację nakładających się sygnałów na danych zbieranych na żywo. Równie ciekawe byłoby sprawdzenia jak w warunkach produkcyjnych sprawują się automatyczne metody dostosowywania parametrów algorytmu analizy danych do zmieniających się warunków pomiarowych.

W Tabeli 6.10 przedstawiono wyniki analiz sygnału składającego się z dwóch symulowanych pulsów. Wydaje się, że zaproponowany algorytm poprawnie radzi sobie w większości przypadków, gdy oba pulsy znacząco różnią się amplitudą. Jednak przypadki, w którym amplitudy były porównywalne (np. przypadek drugi od końca w Tabeli) wydają się sprawiać znacznie większe problemy. Warto by rozważyć czy jest możliwe usprawnienie algorytmu, które pomogłoby w takich przypadkach.

W tekście rozprawy znalazły się drobne błędy językowe w wielu sformułowaniach, jednak nie wpływają one negatywnie na czytelność i zrozumiałość rozprawy.

Przedstawione wyżej uwagi nie zmieniają jednak pozytywnej oceny rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

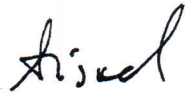
Rozwiązania opracowane w ramach rozprawy zostały zaimplementowane w rzeczywistym urządzeniu działającym w sposób ciągły w warunkach produkcyjnych, co potwierdza ich bezpośrednią przydatność. Zaproponowanie, zaprojektowanie, wykonanie i wdrożenie nowego modelu analizy danych detektora BCM1F jest z pewnością użyteczne i na pewno przyczyni się do rozwoju podobnych metod w przyszłości. Jak wspomniano powyżej, na chwilę obecną trudno jest określić czy rozwiązania opracowane w rozprawie zostaną wdrożone w innych zastosowaniach, jednak zdecydowanie mają taki potencjał. Z drugiej strony podkreślić należy, że wiele technologii opracowywanych przy okazji budowy eksperymentów fizycznych w CERN z początku wydawało się mieć bardzo wąskie zastosowania. Ostatecznie zostały one jednak wykorzystane poza wąsko rozumianą dziedziną fizyki wysokich energii. Dotyczy to technologii z pogranicza informatyki i elektroniki, takich jak opisane w tej pracy, dla których CERN jest doskonałym poligonem doświadczalnym. Z tego punktu widzenia, biorąc pod uwagę zarówno bezpośrednią użyteczność rozwiązań jak i ich potencjał do zastosowań poza dziedziną, należy ocenić ich przydatność jako zdecydowanie zadowalającą.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

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

Podsumowując, omawiana praca spełnia z nadmiarem wymagania ustawowe stawiane

rozprawom doktorskim. Dlatego wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Agnieszki Zagoździńskiej-Bochenek do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Kisiel', written in a cursive style.

dr hab. inż. Adam Kisiel, prof. PW