

Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Warszawa, 23 maja 2017 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 13 czerwca 2017 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

**mgr inż. Stefana Korolczuka**

**temat:** „Optymalizacja algorytmów oraz sprzętowej realizacji cyfrowego układu rozróżniania promieniowania neutronowego i gamma na podstawie kształtów rejestrowanych impulsów”

**promotor – prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk z Politechniki Warszawskiej**

**recenzenci:**

**prof. dr hab. Tomasz Matulewicz z Uniwersytetu Warszawskiego**

**dr hab. inż. Michał Borecki z Politechniki Warszawskiej**

Obrona odbędzie się w dniu 13 czerwca 2017 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 9.00.

Po adresem: [www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje](http://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. Stefan Korolczuk**

**Tytuł: Optymalizacja algorytmów oraz sprzętowej realizacji cyfrowego układu rozróżniania promieniowania neutronowego i gamma na podstawie kształtów rejestrowanych impulsów**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk**

## **Streszczenie**

W rozprawie opisano projekt cyfrowego systemu pomiarowego przeznaczonego do akwizycji i przetwarzania sygnałów ze scyntylacyjnych detektorów promieniowania neutronowego oraz promieniowania gamma ( $\gamma$ ). Postęp w dziedzinie elektroniki spowodował, że systemy detektorowe oparte o elektronikę analogową są zastępowane nowoczesnymi systemami cyfrowymi. Systemy cyfrowe z szybkimi przetwornikami ADC, procesorami, pamięcią oraz układami FPGA dają znacząco większe możliwości przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym, niż systemy analogowe. Metody stosowane w systemach analogowych nie są optymalne dla systemów cyfrowych. Istnieje potrzeba opracowania dedykowanych metod i algorytmów przetwarzania sygnałów z detektorów, które poprawią jakość detekcji promieniowania i dyskryminacji neutronów od promieniowania  $\gamma$ . Praca została podzielona na trzynaście rozdziałów. Dokonano przeglądu współczesnych metod dyskryminacji. Opisano fizyczne podstawy oddziaływania promieniowania z materią oraz fizykę pomiarów radiacyjnych. Następnie przedstawiono zasadę działania fotopowielacza oraz uzasadniono jego wybór do projektowanego systemu. W kolejnych rozdziałach opisano zaprojektowany system cyfrowego przetwarzania sygnałów. Projekt systemu został poprzedzony analizą sygnału z układu detekcyjnego mierzącego odpowiedź detektora na wzorcowe próbki materiałów radioaktywnych. Na tej podstawie opracowano algorytmy przetwarzania sygnałów i dokonano symulacji komputerowych odpowiedzi systemu detekcyjnego w celu weryfikacji jego działania. Następnie zaprojektowano system cyfrowy zawierający przetwornik ADC, układ FPGA oraz procesor. System ten został sprawdzony za pomocą urządzeń pomiarowych a wyniki jego działania zamieszczone w pracy. Następnie zaimplementowano opracowane metody przetwarzania sygnałów pomiarowych w systemie cyfrowym. Wyniki działania całego systemu pomiarowego zamieszczono w pracy. W ostatnich rozdziałach opisano zaimplementowaną metodę pomiarową korekcji zdarzeń typu „pile-up”, czyli pomiar nakładających się na siebie impulsów pomiarowych. Na koniec podsumowano wyniki badań, opisano wnioski z pracy i przedstawiono dalsze kierunki badań.

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

tytuł rozprawy: **Optymalizacja algorytmów oraz sprzętowej realizacji cyfrowego układu rozróżniania promieniowania neutronowego i gamma na podstawie kształtów rejestrowanych impulsów**

Autor rozprawy: **mgr inż. Stefan Korolczuk**

## **0. Wprowadzenie**

Rozróżnianie promieniowania jonizującego poprzez analizę kształtu sygnału elektrycznego wywołanego przez to promieniowanie w detektorach scyntylacyjnych jest ważnym zagadnieniem dla prowadzenia badań fizycznych, w których identyfikacja typu promieniowania ma istotne znaczenie. Jak słusznie pisze mgr inż. Korolczuk w pierwszym zdaniu Wstępu do swojej rozprawy doktorskiej, „*Analogowe przetwarzanie sygnałów pomiarowych było jedyną dostępną techniką przez wiele dekad.*” Ogromne znaczenie dla postępu badań fizyki subatomowej miały te materiały scyntylacyjne, w których kształt wywołanego sygnału elektrycznego zależy od typu padającego promieniowania. Własność taka występuje dla wielu materiałów scyntylacyjnych<sup>1</sup>. Polega ona na występowaniu w sygnale scyntylacyjnym nie mniej niż dwóch składowych tego światła, istotnie różniących się stałą czasową ich zaniku. Typowymi przykładami są tu materiały scyntylacyjne takie jak CsI(Tl) albo BaF<sub>2</sub>. Możliwości identyfikacji rodzaju promieniowania w scyntylatorze CsI(Tl)<sup>2</sup> są wykorzystywane do separacji izotopów wodoru i helu emitowanych w reakcjach ciężkojonowych<sup>3</sup> czy też do separacji zdarzeń w niskotłowych

---

<sup>1</sup> G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, ISBN: 978-1-118-02691-5

<sup>2</sup> H. Grassmann, E. Lorenz, H.-G. Moser, Nucl. Instr. Meth. **A228**, 323 (1985)

<sup>3</sup> A. Pagano et al., Nucl. Phys. A681, 331 (2001)



detektorach poszukujących cząstek ciemnej materii<sup>4</sup>. Niejednorodne pobudzenie szybkiej i wolnej składowej światła scyntylacyjnego w BaF<sub>2</sub> pozwala na dobrą separację fotonów od ciężkich cząstek naładowanych (protonów)<sup>5</sup>. Analogiczne zjawisko występuje także dla ciekłych detektorów scyntylacyjnych, optymalizowanych pod kątem detekcji neutronów, które autor stosował w swoich badaniach.

Powszechnie stosowaną techniką odróżniania kształtu sygnału była metoda całkowania sygnału analogowego w bramkach czasowych obejmujących różne zakresy trwania sygnału scyntylacyjnego. Metoda ta wymaga odpowiedniego opóźniania sygnału scyntylacyjnego, aby docierał do konwerterów analogowo-cyfrowych po otwarciu odpowiednich bramek. Opóźnianie to, realizowane często w długich liniach opóźniających, wprowadzało osłabienie i zniekształcenie, zwłaszcza szybkich sygnałów elektrycznych. W konsekwencji, wprowadzone zaburzenie i osłabienie sygnału pogarszało możliwości separacji rodzajów promieniowania.

Rozwój elektronicznych technik digitalizacji sygnałów, obserwowany w ostatnich latach, pozwoli na całkowite zarzucenie wspomnianych metod i osiąganie lepszych rezultatów z tych samych detektorów niż te dostępne w technikach analogowych. Rozprawa doktorska mgr. inż. Stefana Korolczuka jest właśnie jednym z elementów tego postępu i dla recenzenta, będącego fizykiem jądrowym i w tym sensie konsumentem rozwoju elektroniki, zasługuje na uznanie. Autor rozprawy prowadził badania nad zjawiskiem rozróżniania sygnałów wywołanych przez promieniowanie gamma oraz przez neutrony w detektorze wykorzystującym ciekły scyntylator, wnosząc do tych badań istotny postęp. Zaprojektował, wykonał i przetestował układ elektroniczny oraz przygotował odpowiednie oprogramowanie do rozróżniania fotonów od neutronów w czasie rzeczywistym. Sprawdził też poprawność zastosowanych algorytmów, uwiarygadniając tym samym stworzoną metodę. W pełni zgadzam się ze zdaniem, które autor rozprawy napisał (strona 93): *„Dotychczas stosowane systemy analogowe w najbliższej przyszłości zostaną zastąpione przez systemy cyfrowe podobne do tego, który został opisany w pracy.”*

## 1. Sprawa zagadnienia naukowego

Autor rozprawy podjął się zbudowania cyfrowego układu do zbierania i przetwarzania sygnałów z detektorów scyntylacyjnych. Układ pozwala nie tylko na badanie spektroskopowe amplitudy sygnału, ale także na dyskryminację zdarzeń wywołanych przez promieniowanie gamma od sygnałów wywołanych przez neutrony, prowadzone w czasie

<sup>4</sup>S.C. Wu et al., Nucl. Instr. Meth. **A523**, 116 (2004)

<sup>5</sup>F.M. Marques et al., Nucl. Instr. Meth. **A365**, 392 (1995)

rzeczywistym. W szczególności dotyczy to ulepszenia tej dyskryminacji w zakresie energii neutronów poniżej 250 keV. Autor przeprowadził także weryfikację działania systemu oraz wykonał optymalizację algorytmów zaimplementowanych w szybkich procesorach. Podjął także udaną próbę opisu i wykorzystania zdarzeń związanych z nakładającymi się sygnałami pochodzącymi od promieniowania rejestrowanego w detektorze w bardzo małej separacji czasowej.

Badania autora mają charakter doświadczalny, są też wzbogacone obliczeniami o charakterze modelowym służącymi do interpretacji otrzymywanych wyników.

## **2. Analiza źródeł i stan wiedzy**

Podstawy fizyczne badanego zjawiska autor przedstawił w rozdziałach 2-5. Dotyczą one fizyki detekcji promieniowania oraz podstawowych urządzeń używanych w badaniach spektroskopowych niskoenergetycznego promieniowania jonizującego. Przedstawienie tych tematów jest na poziomie na poziomie umożliwiającym czytelnikowi prawidłowe śledzenie głównych tez pracy. Mogłaby ona być uzupełniona o opis procesów fizycznych leżących u podstaw zróżnicowania kształtu impulsu scyntylacyjnego wywoływanego przez fotony od tego wywoływanego przez neutrony, aczkolwiek jest to zagadnienie bardzo złożone i różne dla wielu materiałów scyntylacyjnych.

Autor przedstawił w rozdziale 6 rozprawy stan wiedzy o metodach dyskryminacji sygnałów. Jest to bardzo szerokie zagadnienie i autor skoncentrował się na kilku wybranych procedurach. Przedstawił także bardzo obfitą literaturę zagadnienia. Niektóre metody zostały jednak opisane zbyt skrótowo (dotyczy to ostatnich czterech metod wspomnianych tylko bardzo krótko we wspomnianym rozdziale rozprawy). Warto było umieścić w tym rozdziale choć po jednym przykładzie zastosowania każdej ze wspomnianych metod. Byłoby to dobre uwidocznienie skuteczności tych metod oraz zakresu ich stosowalności, zapewne nieidentycznego.

Warto podkreślić, że autor zamieścił w spisie literatury nie tylko odnośniki, ale także pełne tytuły artykułów. Jest to bardzo przydatne dla czytelnika – łatwiej jest dokonać odpowiedniego wyboru przeszukując literaturę zagadnienia.

Sposób opisu zagadnienia w oparciu o literaturę świadczy o dobrym opanowaniu tematu przez autora i o jego wiedzy w tym zakresie. Wnioski autora są dobrze sprecyzowane i przekonujące, jak również właściwie naświetlają podjęty temat badawczy wobec dotychczas otrzymanych rezultatów.



### **3. Rozwiązanie postawionego zagadnienia**

Zagadnienie badawcze postawione przez autora rozprawy zostało w pełni rozwiązane. Mgr inż. Stefan Korolczuk zastosował prawidłowe naukowe podejście do badanego problemu. Porównał różne metody, przeprowadził drobiazgowo weryfikacje i wykonał optymalizację pewnych procedur analitycznych. Przedstawiona na rysunku 10.5 dyskryminacja fotonów od neutronów, otrzymana metodą zaproponowaną i zaimplementowaną przez autora rozprawy, jest bardzo wyraźna i zdaniem recenzenta może być z powodzeniem stosowana od energii sygnału powyżej 100 keV<sub>ee</sub> (w sposób stochastyczny nawet dla niższych energii). Selektywność nowej metody jest wyraźnie lepsza od wcześniej stosowanych.

### **4. Oryginalność rozprawy doktorskiej**

Oryginalność wyników przedstawionych w rozprawie doktorskiej mgr. inż. Stefana Korolczuka przejawia się w kilku czynnikach:

- a) Rozwiązania w sferze hardware: nie tylko oryginalny układ zbierania danych zbudowany w oparciu o FPGA (rys. 7.9), ale także zastosowanie aktywnego dzielnika napięcia (rys. 7.3) do zasilania fotopowielacza.
- b) Rozwiązania w sferze oprogramowania (rozdział 7.7 i inne), w tym optymalizacja procesu dyskryminowania sygnałów pochodzących od neutronów od tych pochodzących od fotonów, realizowana w czasie rzeczywistym w oparciu o wprowadzony przez autora filtr decyzyjny (rys. 9.8).
- c) Pozytywna weryfikacja zastosowanej metody dyskryminacji i uzyskanie lepszej selektywności.
- d) Opracowanie algorytmu dekompozycji zdarzeń typu „pile-up” .

### **5. Umiejętność przedstawienia uzyskanych wyników**

Autor w sposób zrozumiały przedstawił założenia badawcze, jak i otrzymane wyniki. Liczne rysunki dobrze ilustrują rezultaty pracy. Jak wcześniej wspomniałem, uśrednienie niektórych widm w obszarze ich słabej zmienności byłoby wskazane, zwłaszcza że cechują je czasami silne fluktuacje o charakterze statystycznym.

### **6. Słabe strony rozprawy i główne wady**

Ciekawy test systemu akwizycji dla sygnału o stałej amplitudzie ale zmienianej szerokości jest bardzo ciekawy, ale autor nie podał informacji, czy numer pomiaru jest skorelowany z czasem trwania sygnału. Na

rysunku 7.15 widać pewną (słabą) korelację, którą trudno bez tej wiedzy dyskutować.

Sformułowanie w rozdziale 11 o analogicznym kształcie widma promieniowania gamma (rysunek 11.1) w procesie nakładania się zdarzeń (pile-up) można było lepiej uwidocznić odpowiednio przesuwając część widma zarejestrowanego w zakresie energii powyżej 700 keV. Przy okazji, w obszarze energii powyżej 1400keV można zaobserwować trzy struktury, z których pierwszą jest zapewne linia 1,46 MeV pochodząca z rozpadu typu wychwył elektronu radioaktywnego izotopu  $^{40}\text{K}$ . Brak jednak w pracy komentarza dotyczącego tej części widma.

Do pewnych niezręczności należą:

1. na stronie 15 użycie słowa „stabilny izotop” dla  $^{12}\text{C}$  oraz tylko „izotop” dla  $^{13}\text{C}$ , co by mogło sugerować że  $^{13}\text{C}$  już nie jest stabilny. Tymczasem oba wymienione izotopy węgla są stabilne.
2. Na tejże stronie „neuronów” powinno być zamienione na „neutronów”.
3. W paragrafie 2.5 autor pisze, że anihilacja pozytonu prowadzi do emisji dwóch fotonów o energii 511 keV każdy. Tymczasem obserwowane są inne kanały anihilacyjne, z których ważny jest kanał z emisją trzech fotonów<sup>6</sup>, który może odegrać znaczącą rolę dla poprawienia rozdzielczości pozycyjnej w tomografii PET<sup>7</sup>.
4. Dyskutując scyntylatory nieorganiczne, warto było zwrócić uwagę na nietypową własność scyntylatora  $\text{BaF}_2$ , którego szybka składowa ma czas zaniku poniżej nanosekundy<sup>8</sup>.
5. Pisownia „rozproszenie komptona” na stronie 29 jest niewłaściwa, tym bardziej że w rozprawie powszechnie występuje pisownia „rozproszenie Comptona”.
6. Na rysunku 6.2 zaznaczenie graficzne kształtu bramek jest w kolizji z użytymi oznaczeniami „long” i „short”.
7. Rysunek 7.4 byłby bardziej czytelny, gdyby autor dokonał uśrednienia liczby zliczeń w przedziale kilku czy też dziesięciu kanałów w obszarze poza fotopikiem.
8. Na rysunku 7.14 powinna być informacja o wartości odchylenia standardowego lub wartości FWHM.
9. Sformułowanie „detekowane promieniowanie” (strona 60) jest bardzo niezręczne, można użyć sformułowania „zarejestrowane promieniowanie” albo „wykrywane promieniowanie”.
10. Skrót SVD użyty po raz pierwszy na stronie 62 nie jest wyjaśniony w spisie skrótów (na stronach 103-104).
11. Autor podaje zapis „ $^{238}\text{PuBe}$ ” jako skład neutronowego źródła plutonowo-berylowego (strony 65, 66, 68, 78, 80, 81, 82, 83). Jest

<sup>6</sup>S. DeBenedetti i R.T. Siegel, *PhysicalReview***94**, 955 (1954)

<sup>7</sup>K.Kacperski, N.M. Spyrou, F.A. Smith, *IEEE Trans. Med. Im.* M9-451 (2004)

<sup>8</sup>M. Laval, M. Moszyński et al., *Nucl. Instr. Meth.* **206**, 169 (1983)



to zastanawiające, gdyż separacja izotopowa plutonu jest chyba rzadko prowadzona (skład izotopowy jest regulowany raczej poprzez modyfikację strumienia neutronów w reaktorze. Uważa się<sup>9</sup>, że aktualna kompozycja izotopowa starych źródeł PuBe jest słabo określona. Stąd też wolałbym, aby używać skrótów PuBe, bez specyfikacji izotopowej, jeśli nie jest ona potwierdzona dedykowanymi pomiarami.

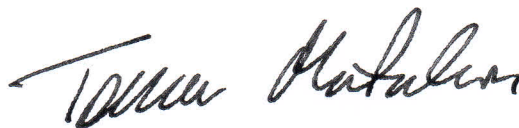
Wymienione w tej części uwagi oraz zauważone niezręczności nie mają wpływu na ogólnie pozytywny obraz przeprowadzonych badań oraz samej rozprawy. Są to często niezręczności, które w przypadku procedury stosowanej w wielu krajach (Francja, Hiszpania) by zniknęły, gdyż tamże ostateczna wersja rozprawy jest drukowana po otrzymaniu uwag od recenzentów.

## 7. Przydatność dla nauki

Pozytywnie oceniam przydatność wyników otrzymanych przez mgr. inż. Stefana Korolczuka dla kilku aspektów badań podstawowych i stosowanych:

- a) Możliwość sprawnej separacji zdarzeń pochodzących od neutronów od tych pochodzących od fotonów, realizowana w czasie rzeczywistym, może być wykorzystana w wielu aspektach badań spektroskopowych fizyki jądrowej, jak i zastosowań wymagających czułości na emisję neutronów (np. kontrola transportu).
- b) Elastyczność opracowanej metody dyskryminacji, która dla innego typu detektora polegałaby zapewne tylko na zmianie kształtu filtru decyzyjnego.

8. Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez mgr. inż. Stefana Korolczuka **spełnia wymagania** stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.



---

<sup>9</sup>J. Bagi, L. Lakosi, C.T.Nguyen, Nucl. Instr. Meth. **B366**, 69 (2016)



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

**Tytuł rozprawy:** *Optymalizacja algorytmów oraz sprzętowej realizacji cyfrowego układu rozróżniania promieniowania neutronowego i gamma na podstawie kształtów rejestrowanych impulsów*

**Autor rozprawy:** *mgr inż. Stefan Korolczuk*

- 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)?**

*Przedstawiona rozprawa ma charakter doświadczalny oraz konstrukcyjny. Rozprawa dotyczy udoskonalania fonicznych narzędzi badawczych, a w szczególności detektorów promieniowania wyposażonych w cyfrowe układy rozróżniające promieniowanie gamma od neutronowego. W pracy postawiono tezę, w której autor postuluje, że: „Możliwe jest, poprzez zastosowanie odpowiedniego przetwornika analogowo-cyfrowego i cyfrowego przetwarzania sygnałów, opracowanie metod i algorytmów rozróżnienia impulsów na podstawie ich kształtu, które pozwolą na osiągnięcie lepszych wyników od dotychczas istniejących technik pomiarowych, przy użyciu tych samych detektorów”. Tezy jasno wskazują zagadnienie naukowe, którego rozwiązanie ma także wydźwięk praktyczny. Ponad to, w rozprawie jasno sformulowano szczegółowy cel pracy którym jest udoskonalenie metody detekcji promieniowania o energii od kilkudziesięciu keV do kilku MeV, a w szczególności poprawa parametrów dyskryminacji promieniowania w zakresie energetycznym poniżej 250keV.*

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

*W rozprawie przeprowadzono bardzo wszechstronną analizę źródeł. Dotyczy ona informacji umieszczonych w renomowanych monografiach, czasopismach o wysokim IF, aktualnych komunikatach z konferencji międzynarodowych oraz w dokumentacjach*

produktów. Na podstawie przeglądu literatury autor wyznaczył parametry obecnych systemów detekcji oraz dyskryminacji promieniowania sygnałów gamma i neutronowych. W szczególności zaprezentowane zostały teoretyczne metody dyskryminacji oparte na analizie kształtu impulsu. Ze względu na krótkie czasy impulsu, rzędu ns, metody dyskryminacji zostały zestawione z możliwymi realizacjami technicznymi. W rozprawie, taki przegląd wiedzy należy uznać za wzorowy. Ponadto, przegląd wiedzy umożliwił wskazanie rzeczywistych zagadnień, które należy rozwiązać. Zagadnienia te są jasno sformułowane na 13 stronie rozprawy i pokrywają się z zakresem i planem pracy. Oznacza to, że autor jest wyjątkowo kompetentny w analizowanym obszarze.

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

Autor rozwiązał postawione zagadnienia na drodze eksperymentalnej wspomagananej metodami inżynierii komputerowej. Eksperymenty prowadzone były w sposób uporządkowany, zgodnie z metodami opracowania konstrukcji dedykowanych przyrządów pomiarowych. W pierwszej kolejności autor, zgodnie z aktualnym stanem wiedzy opracował konstrukcję wejściowego, analogowego, stopnia detektora zbudowanego ze scyntylatora i fotopowielacza oraz układów towarzyszących: aktywnego dzielnika napięcia oraz interfejsu analogowego umożliwiającego pracę układu do częstotliwości 1.8GHz. Układ ten został scharakteryzowany metodami fizycznymi z zastosowaniem skalibrowanego źródła promieniowania  $^{137}\text{Cs}$  oraz metodami elektronicznymi z zastosowaniem analizy charakterystyk fazowych i amplitudowych. Następnie, na podstawie symulacyjnych analiz szumu fazowego, autor opracował dedykowany układ przetwornika analogowo-cyfrowego.

Wynikiem opracowań konstrukcyjnych są płytki z układami elektronicznymi przeznaczonymi do bezpośredniej pracy z płytą ZC706 Xilinx, która zawiera wydajny mikroprocesor i programowalny układ FPGA. Widok wykonanego układu pokazano na rysunku 7.10, na stronie 48 rozprawy. Płyta ta posłużyła do osadzenia cyfrowych metod dyskryminacji impulsów promieniowania.

Do cyfrowej rejestracji impulsu autor zastosował, cyfrowe metody synchronizacji danych na interfejsie przetwornika AC i płyty ZC706, oraz wykonany w układzie FPGA programowy estymator pochodnej funkcji zrealizowany w postaci filtru o skończonej odpowiedzi impulsowej i detektor progowy. Do detekcji szeregu impulsów autor



wykorzystał algorytm karuzelowy. Weryfikację parametrów rejestracji i detekcji w proponowanym systemie autor przeprowadził z wykorzystaniem systemu DNG pracującego w NCBJ.

W rozdziale 8, autor proponuje, rozpoznawanie kształtu zarejestrowanych impulsów na podstawie wzorca wektorowego. Przynależność impulsu do typu promieniowania autor proponuje realizować na podstawie porównania wartości dwu iloczynów skalarnych – wzorców wektorów promieniowania neutronowego i gamma, z bieżąco rejestrowanym sygnałem. W pracy, miara przynależności impulsu jest, zdefiniowana w postaci leksykalnej – równania 8.13, 8.14 i oznaczona, jako PSD. Podejście takie jest ciekawe i prawidłowe. W dalszym ciągu pracy, podczas weryfikacji opracowanego systemu, autor proponuje dwie dalsze miary dyskryminacji. Miara  $PSD_{CC}$ , ma określoną wartość – równanie 9.1 i jest wielkością wyznaczaną na podstawie pól powierzchni rejestrowanych impulsów. Miara  $PSD_{MF}$  ma wartość określoną równaniem 9.4 i bazuje, na postulowanej w rozdziale 8, właściwości wektorowej wzorcowych sygnałów wyznaczanej na podstawie odpowiedzi filtru dopasowania i numerycznej wartości dyskryminacji. Odpowiedzi proponowanego systemu przedstawione są dla miar  $PSD_{CC}$  i  $PSD_{MF}$  na wykresach 9.3 oraz 9.9. Analizę jakości miar doktorant przeprowadził prawidłowo tj. z wykorzystaniem dodatkowej miary jaką jest współczynnik dobroci (ang. Figure of Merit – FOM) zdefiniowany w równaniu 9.2. Odpowiednie dla metod dyskryminacji wyniki pokazano na rysunkach 9.5 i 9.10.

Wyniki rozróżniania promieniowania neutron / gamma w opracowanym systemie pokazano w rozdziale 10, w którym wprowadzono współczynnik  $PSD_{MF\_HW}$ , którego jawnej definicji nie podano. Natomiast, na rysunku 10.1, podano algorytm wyznaczania współczynnika PSD. Można się, więc domyśleć, że określa on wzmiankowany współczynnik  $PSD_{MF\_HW}$ . Definicja indeksów MF\_HW występuje dopiero w opisie rysunku 10.8. Dotyczy ona zgodnie z domysłami parametrów dyskryminacji promieniowania w opracowanym systemie. W tym przypadku przebieg wartości współczynnika dobroci pokazany na rysunku 10.6 jest, na tle doniesień literaturowych, - rewelacyjny. Rysunek podsumowujący metody dyskryminacji pokazany jest na stronie 84.

Należy więc wnioskować, że założenia przyjęte przez autora dotyczące możliwości poprawy parametrów instrumentów okazały się uzasadnione. Teza pracy udowodniona a postawione cele zostały osiągnięte.

**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?**

*W pracy występuje szereg oryginalnych rozwiązań szczegółowych związanych z metodami analizy i adaptacjami algorytmów przetwarzania danych pomiarowych. Np.: - osadzenie sprzętowe algorytmów dyskryminacji impulsów o podobnych kształtach na płycie ZC706; - opracowanie algorytmu do dekompozycji sygnałów z nachodzących na siebie impulsów, w tym właściwego szeregowania rejestrowanych impulsów promieniowania.*

*Jednak podstawowa oryginalność badawcza rozprawy polega na kompleksowej analizie sygnałów generowanych przez wzorce promieniowania i właściwościach metod przetwarzania sygnału na potrzeby dyskryminacji typu promieniowania. Oryginalne wyniki umożliwiły zgodnie z założeniami realizację dyskryminacji dla promieniowania o energiach mniejszych od 250keV i dla szeregu rejestrowanych zjawisk, gdy rejestrowane impulsy zachodzą na siebie.*

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

*Układ tekstu rozprawy jest właściwy. Autor w sposób klarowny przedstawia założenia i uzyskane wyniki. Przykładem przekonującego przedstawienia wyników jest dyskusja umieszczona w rozdziale 12 zatytułowana „Zakończenie – Podsumowanie i wnioski”.*

*Praca jest zredagowana prawidłowo. Jednakże trafiają się liczne niedociągnięcia edycyjne związane ze składem „drukarskim” pracy. Rysunki zamieszczone w pracy charakteryzuje wysoki poziom jakości graficznej, jednak na niektórych – brakuje opisu osi (rys. 7.7), - na innych brakuje precyzyjnie słownie opisanej osi – zamiast symbolu współczynnika, którego znaczenia należy się domyśleć, np. rys. 9.5, 9.10.*

*Jednym z błędów jasności przekazu jest opis dyskryminacji przynależności impulsu do typu promieniowania, który autor zaproponował oprzeć o matematyczny model sygnału przedstawiony w równaniu 8.1 na stronie 60. Model ten nie jest precyzyjnie opisany. W zależności na  $f(x)$  po prawej stronie widzimy parametr  $t$ , poza tym zależności  $f$  i  $s$  nie są opisane. Można domyśleć się że jedna zależność to sygnał, druga to szum. Ponad to raz autor twierdzi, że model dotyczy impulsu z systemu pomiarowego, następnie - że model nie opisuje wszystkich zjawisk występujących w detektorze ciekłym. Z przyjemnością*



dowiedziałbym się, co dokładnie i w którym miejscu w opracowanym systemie przedstawia zaproponowany model. Np. zaznaczone miejsce na schemacie blokowym systemu.

Powyżej wykazane błędy nie umniejszają wagi rozprawy.

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

Duża część rozprawy jest realizowana we współpracy z fizyków z NCBJ i elektroników z WEiTI PW. Można zauważyć, że w pracy naukowej autora występuje podejście wybitnie praktyczne; - skoncentrowane na opracowaniu działającego systemu o lepszych niż dotychczas parametrach, - oraz skoncentrowane na opublikowaniu szeregu prac w czasopiśmie o obiegu międzynarodowym. Publikacje autora charakteryzuje wysoki poziom edycyjny i merytoryczny. Należy jednak zauważyć, że Autor w rozprawie zwracał mniejszą uwagę na opis używanych do charakteryzacji systemu miar i współczynników w modelach matematycznych niż we wzmiankowanych publikacjach.

#### **7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?**

Rozprawa jasno wskazuje na możliwość praktycznego zastosowania opracowanego systemu w eksperymentach fizycznych. Ponadto, rozprawa wskazuje kierunek rozwoju dedykowanej do detekcji promieniowania aparatury elektronicznej.

#### **8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

- a) niespełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b) wymagającą wprowadzenia poprawek i ponownego zrecenzowania
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Michał Borek  
podpis