

Kraków, 29.08.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Kucewicz  
Instytut Elektroniki  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica2  
w Krakowie  
al. Mickiewicza 30

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i  
Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej  
na podstawie uchwały nr 647/28/RDND02/2021-2024 z dnia 22 maja 2023 r.**

Tytuł rozprawy:

**Metodyka i układy sterowania wiązkami cząstek naładowanych w mikrosystemach MEMS**

Autor rozprawy:

**mgr inż. Marcin Białas**

## **1. Wybór tematu, cel i zakres pracy**

Rozprawa dotyczy prac badawczych związanych z charakteryzacją i optymalizacją mikrosystemów MEMS, które opracowywane są w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej.

Autor przedstawił swoje wyniki badań związane z budową mikroskopu elektronowego MEMS, miniaturowych spektrometrów masowych, a także miniaturowego źródła promieniowania rentgenowskiego. Obszar tych prac jest bardzo szeroki i wymagał sporej wiedzy z dziedziny elektroniki, technologii elektronicznej, mikromechaniki, automatyki i technik pomiarowych. Tworzenie urządzeń wymagało od Autora opracowania i wykonania układów mikromechanicznych oraz elektronicznych układów zasilających i układów elektroniki odczytowej, które z nimi współpracowały. Ponadto niezbędne było przygotowanie oprogramowania do sterowania, zbierania i analizy danych.

W rozprawie doktorskiej zostały przedstawione autorskie rozwiązania układów

elektronicznych i mechatronicznych oraz programów komputerowych, niezbędnych do prowadzenia badań. Autor opisał również przeprowadzone doświadczenia, które potwierdziły funkcjonalność skonstruowanych przez niego urządzeń.

## 2. Omówienie rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z 8 rozdziałów, w tym z wprowadzenia, podsumowania i bibliografii.

W rozdziale drugim, zatytułowanym „Wstęp teoretyczny”, Autor opisał właściwości źródeł elektronów i jonów oraz ruch cząstek naładowanych w polu elektrycznym i magnetycznym. W dalszej części rozdziału zostały opisane przykłady układów zasilania systemów elektronowych i jonowych, rodzaje systemów odchylających wiązki oraz systemy detekcji cząstek naładowanych. Informacje zaprezentowane w tym rozdziale jedynie sygnalizują, w jakim obszarze tematycznym będą koncentrowały się badania doktoranta.

O wiele ciekawszy jest rozdział trzeci, w którym Autor podaje przykłady przyrządów elektronowiązkowych bazujących na wykorzystaniu techniki MEMS, w tym również te, które zostały wykonane w Katedrze Mikrosystemów. Projektowanie takich systemów z jednej strony wymaga wszechstronnej wiedzy, poczynając od badań materiałowych, procesów technologicznych oraz konstrukcyjnych, a drugiej specyficznych układów elektronicznych kompatybilnych z układami MEMS. W tym rozdziale Autor przedstawił założenia projektowe i konstrukcyjne mikroźródła promieniowania X, strukturę miniaturowego mikroskopu elektronowego oraz strukturę spektrometru masowego.

Opis układów elektronicznych Autor umieścił w kolejnym rozdziale. Zostały przedstawione w pełni autorskie opracowania układów zasilających, generatorów, układów sterujących, a także układy elektroniki odczytowej, detektory oraz urządzenia mechatroniczne. Są to najczęściej układy prototypowe adaptowane przez Autora do potrzeb badawczych. W sumie Autor zaprojektował i zbudował 11 różnych układów elektronicznych.

W rozdziale piątym zostało opisane oprogramowanie, które Autor przygotował lub adoptował w celu sterowania skonstruowanymi przez siebie urządzeniami, a także do zbierania, przetwarzania i analizowania danych uzyskanych w trakcie eksperymentów. Każdy z opisanych programów wyposażony jest w graficzny interfejs użytkownika. Służą one do kontroli parametrów pomiarowych oraz do graficznego prezentowania wyników.

Najistotniejszą częścią rozprawy jest rozdział szósty, który też jest rozdziałem

najobszerniejszym. Zajmuje on 56 stron. Autor podzielił go na 3 podrozdziały, w który opisał badania trzech różnych mikrosystemów: mikroskopu elektronowego MEMS, miniaturowych spektrometrów mas oraz miniaturowego źródła promieniowania rentgenowskiego, w których wykorzystał opisane wcześniej konstrukcje elektroniczne oraz oprogramowanie.

Bibliografia zawiera 64 pozycje literaturowe, które są cytowane w pracy. Aż 21 z nich to publikacje związane z pracami prowadzonymi przez pracowników Katedry Mikroelektroniki. Autor rozprawy zacytował również 13 swoich publikacji, z których w czterech jest pierwszym autorem.

### **3. Oryginalność rozprawy, samodzielny i oryginalny dorobek Autora**

Rozprawa doktorska dotyczy budowy miniaturowych urządzeń, których działanie oparte jest na wykorzystaniu wiązki cząstek naładowanych. Autor opisuje trzy różne aplikacje: mikroskop elektronowy, spektrometr mas oraz źródło promieniowania rentgenowskiego. Należy zdawać sobie sprawę, że zbudowanie każdego z takich urządzeń jest procesem bardzo skomplikowanym, który może być zrealizowany jedynie przez szeroki zespół badawczy obejmujący specjalistów z zakresu technologii elektronicznej i materiałoznawstwa, jak i elektroniki oraz mechatroniki. Autor był jednym z członków zespołu i koncentrował się głównie na budowie układów elektronicznych niezbędnych do zasilania, sterowania i akwizycji danych. W każdej z trzech aplikacji ma swój niezaprzeczalny i samodzielny wkład.

W miniaturowym mikroskopie skaningowym opracował i zbadał funkcjonalność oktopolowego układu odchylającego. Przy pomocy zbudowanego wzmacniacza dokonał pomiarów prądów elektronowych przechodzących przez próbkę, jak i wstecznie rozproszonych, a następnie przeprowadził analizę powstałych obrazów. Ponadto doświadczalnie potwierdził możliwość budowy miniaturowego mikroskopu elektronowego, ale wymagać to będzie opracowania stabilnego działa elektronowego, które mogłoby pracować przy energiach rzędu 15 keV. Wyniki przedstawiono na 4 konferencjach i opublikowano w 3 artykułach naukowych. Należy zauważyć, że w 2 publikacjach doktorant jest pierwszym autorem.

Prace związane z budową spektrometru masowego obejmowały trzy typy urządzeń: spektrometr ruchliwości jonów, spektrometr ToF oraz spektrometr z filtrem kwadrupolowym. Eksperymenty przeprowadzone ze spektrometrem ruchliwości jonów były obiecujące, ale wymagałyby istotnych zmian konstrukcyjnych, aby uzyskać zadowalające parametry. W

przypadku spektrometru ToF udało się Autorowi znaleźć zależność masy atomowej od czasu przelotu (rys. 112), dzięki czemu możliwe stało się rozpoznawanie mieszanin gazowych dla gazów o minimalnej masie atomowej większej niż 8. Wynik pracy zaprezentowano na jednej konferencji. Najlepsze wyniki pomiarowe uzyskał Autor podczas testów spektrometru z filtrem kwadrupolowym (pokazano to na rys. 117). Przy jego pomocy można określać skład mieszanin gazowych, a także zwartość ilościową poszczególnych gazów. Wyniki tych prac zostały opublikowane na 2 konferencjach.

Nieco inny charakter miały badania związane z miniaturowym źródłem promieniowania rentgenowskiego. Autor prowadził badania 11 różnych materiałów scyntylacyjnych oraz gotowych scyntylatorów, które wykorzystywał do detekcji promieniowania rentgenowskiego, uzyskiwanego z 5 różnych warstw metalicznych, każdej o 3 różnych grubościach, które bombardowano wysokoenergetyczną wiązką elektronów. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie, który rodzaj pokrycia oraz jego grubość są optymalne do zastosowania w roli anody mikroźródła X, a także dobór najkorzystniejszych materiałów scyntylacyjnych do detekcji tego promieniowania. Autor zbudował system do rejestrowania obrazów w widmie rentgenowskim oraz z jego pomocą pokazał uzyskane obrazy przykładowych próbek. Wyniki tych badań zaprezentowano na 1 konferencji naukowej. Moim zdaniem, ta część pracy wyróżnia się dużą profesjonalnością i skrupulatnością prowadzonych badań.

#### **4. Zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy**

Rozprawa ma 140 stron objętości. Obejmuje bardzo szeroki obszar badań, które dodatkowo mają charakter interdyscyplinarny. Wydaje się, że Autor bardzo rozsądnie zdecydował się podzielić swą pracę na dwie części. W pierwszej opisał różnego rodzaju układy elektroniczne, które zaprojektował i wykonał, a także omówił przygotowane oprogramowanie służące do sterowania i akwizycji danych. W drugiej części opisał trzy różne miniaturowe przyrządy, w których wykorzystał, w zależności od potrzeb, uprzednio opisane układy oraz oprogramowanie. Dzięki takiemu podejściu, skupia uwagę czytelnika na funkcjonowaniu samych przyrządów, gdzie istotna jest głównie idea pomiarowa, natomiast elementy składowe mają charakter drugorzędny.

Na wyróżnienie zasługuje bardzo staranne umieszczanie rysunków w pobliżu związanego z nimi tekstu opisu.

## 5. Główne wady rozprawy

Wydaje się, że rozdział drugi (a w szczególności pierwsze 3 podrozdziały) ma charakter bardzo ogólnikowy i jest dość luźno związany z treścią rozprawy. Czytelnik mający rozeznanie w tematyce rozprawy nie dowiaduje się nic nowego.

W opisie parametrów równania (1) oznaczono, że wielkość  $e\varphi$  to „zewnątrzna praca wyjścia”. Bardziej poprawne było nazwanie tej wielkości pracą wyjścia. Literę „A” opisano jako „stałą, określającą właściwości emisyjne materiału”. W literaturze ta stała jest opisywana jako stała Richardsona i ma ona znaczenie fizyczne. Z kolei w równaniu (2) wielkości B, C powinny być raczej nazwane współczynnikami.

Czytając rozprawę ma się często wrażenie, że opisywane przez Autora badania są często niedokończone. Przykładem może być budowa i opis spektrometru kwadrupolowego w rozdziale 6.2.3. Wyniki badań, przedstawione na rys. 117. potwierdzają znakomitą funkcjonalność przyrządu. Autor pisze, że na ich podstawie można „określić rodzaje gazów, wchodzących w skład badanej atmosfery, ale także ich ilość”. Z niewiadomych przyczyn nie kontynuuje badań ilościowych, choć wydaje się to, naturalną kolejną rzeczą.

Innym przykładem może być zakończenie prac nad budową spektrometru ruchliwości jonów, które po wstępnych badaniach zostały wstrzymane. Autor wskazuje, że uzyskanie użytecznych parametrów wymagałoby m.in. zastosowanie wzmacniacza ładunkowego w układzie odczytowym. Zresztą także w innych aplikacjach, zbudowanych przez Autora, taki wzmacniacz byłby bardzo użyteczny. Wzmacniacze ładunkowe są od wielu lat budowane jako układy ASIC, dla potrzeb praktycznie wszystkich eksperymentów fizyki wysokich energii. Można tam też znaleźć bardzo czułe detektory do obrazowania torów cząstek naładowanych. Należałoby się zastanowić nad możliwością ich wykorzystania w pracy doktoranta.

## 6. Podsumowanie

Celem pracy badawczej była charakteryzacja oraz usprawnienie działania trzech mikrosystemów zrealizowanych w Katedrze Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej. Autor zrealizował główny cel pracy poprzez opracowanie i wykonanie szeregu układów elektronicznych i urządzeń mikromechanicznych, a także oprogramowania, które były niezbędne do uruchomienia, badań oraz analizy danych, pozwalających na charakteryzację wspomnianych mikrosystemów.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa prezentuje odpowiedni poziom naukowy, a prezentowane wyniki badań są oryginalnym dorobkiem Doktoranta. Recenzowana praca stanowi twórczy wkład w rozwój dziedziny, zarówno w sferze poznawczej, jak i praktycznej. Mgr inż. Marcin Białas bardzo dobrze rozwiązał postawione sobie zadania naukowe i wykazał się wiedzą oraz umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora w Dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Białasa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.) i w związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wojciech Kucwiński