

**Prof. zw. dr hab. inż. Janusz Mroczka, czł. koresp. PAN, dr h.c. (mult.)**

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej  
Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej  
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław  
tel. (071)3211247  
(071)3206232  
fax: (071)3214277  
e-mail: janusz.mroczka@pwr.edu.pl

adres prywatny:  
ul. Wysłoucha 65  
52-433 Wrocław  
tel.: (071) 3635384

## RECENZJA

pracy doktorskiej mgra inż. Dariusza Kusia  
pt. „Metoda detekcji termoemisji elektronowej w próżniowych przyrządach  
pomiarowych”

Promotor: dr hab. inż. Jarosław Sikora, profesor uczelni

**Tematyka pracy** dotyczy modelowania i weryfikacji doświadczalnej metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody. Termoemisyjne źródła elektronów charakteryzują się relatywnie prostą konstrukcją i niskim kosztem i dlatego są szeroko stosowane, między innymi, w próżniowych przyrządach pomiarowych, w których wykorzystuje się interakcję termoemisyjnej wiązki elektronów z materią. Parametry wiązki elektronowej, w tym natężenie i energia elektronów zależą w znaczącym stopniu od układu polaryzacji źródła, który powinien zapewnić odpowiednią jakość stabilizacji, ponieważ to warunkuje poprawność pomiaru. Zagadnienie doboru układu stabilizacji staje się złożone jeżeli wymagane są wysokie energie elektronów, np. w badaniach przekrojów czynnych na jonizację gazu elektronami, gdzie wykorzystuje się elektrony o energii do 1 MeV i wymaga to zastosowania napięcia przyspieszającego elektrony, w przybliżeniu równego napięciu anodowemu, o wartości do 1 MV. Złożoność zagadnienia wynika z faktu, że układ regulacji mocy elektrycznej dostarczanej do katody znajduje się na potencjale katody, natomiast układ pomiaru i monitorowania natężenia prądu

termoemisji elektronowej na potencjale anody. W celu uproszczenia struktury, poprawy jakości układu stabilizacji oraz poszerzenia zakresu energii elektronów, Autor zaproponował zbadanie metody pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody, wykorzystując istotny fakt, że stanowi on składnik całkowitego natężenia prądu katody. Natężenie prądu termoemisji elektronowej jest relatywnie małym składnikiem całkowitego natężenia prądu katody, stąd rozdzielenie i pomiar jego natężenia jest zagadnieniem złożonym.

**Cel pracy** został sformułowany przez Autora we wprowadzeniu. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny, a przedstawione w niej zagadnienia dotyczą istotnych problemów metodologicznych odnoszących się do metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody.

Teza pracy postawiana przez Autora stwierdza, że: przetwarzanie multiplikatywno-addytywne sygnałów napięciowych wprost proporcjonalnych do wartości natężenia prądu katody umożliwia pomiar natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody.

Weryfikację postawionej tezy Autor dokonuje przez badania modelowe metody pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody oraz badania eksperymentalne parametrów przetwarzania zaprojektowanym autorskim katodowym przetwornikiem natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie. Opracowanie metody i projektu przetwornika wymagało wykonania szeregu zadań, których realizację Autor opisuje w kolejnych rozdziałach rozprawy eksponując jednocześnie umiejętność prowadzenia autorskiej analizy metrologicznej i realizacji pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w niskonapięciowym obwodzie zasilania katody. Tematyka rozprawy mieści się w obszarze doskonalenia narzędzi pomiarowych wykorzystujących wysokonapięciowe termoemisyjne źródła elektronów.

### **Struktura i zawartość merytoryczna rozprawy.**

Rozprawa liczy 95 stron i zawiera sześć zasadniczych rozdziałów oraz wprowadzenie i podsumowanie z wnioskami końcowymi. Zasadniczą treść pracy uzupełniają wykazy skrótów i cytowanej literatury (83 pozycje literaturowe), streszczenia w j. polskim i j. angielskim.

Rozprawa składa się z sześciu głównych rozdziałów.

W rozdziale drugim przedstawiono opis analityczny zjawiska termoemisji elektronowej z uwzględnieniem efektu Schottky'ego oraz wyjaśniono pojęcie pozornej stałej termoemisji elektronowej.

Rozdział trzeci prezentuje przegląd zastosowań termoemisyjnych źródeł elektronów w przyrządach pomiarowych wykorzystujących w procesie pomiarowym oddziaływanie wiązki elektronowej z materią, w zakresie wysokich energii elektronów. W przykładowych zastosowaniach, w tym jonizacji gazu, wytwarzaniu promieniowania rentgenowskiego, emisji elektronów Augera, uzasadniono potrzebę stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej w celu uzyskania relatywnie wysokiej dokładności i powtarzalności wyników pomiarów realizowanych przyrządami pomiarowymi.

Rozdział czwarty prezentuje układy polaryzacji termoemisyjnego źródła elektronów zapewniające stabilizację natężenia prądu termoemisji elektronowej. Autor wykazuje, że w stosowanych dotychczas układach, z uwagi na realizację pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej względem potencjału anody, układ ujemnego sprzężenia zwrotnego łączy wysokonapięciowy obwód zasilania anody z niskonapięciowym obwodem sterowania katody, co ma niekorzystny wpływ na powtarzalność wyników pomiarów w przyrządach pomiarowych. Tak przedstawiony materiał poparty rozwiązaniami z literatury staje się podstawą do sformułowania tezy rozprawy, wskazującej, że można zrealizować pomiar natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody w oparciu o przetwarzania multiplikatywno-addytywnego sygnałów napięciowych wprost proporcjonalnych do wartości natężenia prądu katody.

W rozdziale piątym, na podstawie analizy wyznaczonych numerycznie rozkładów temperatury katody, Autor określa względną długość strefy izotermicznej katody, dla zadanych wartości natężenia prądu katody oraz przedstawia oryginalny, statyczny model termoemisyjnego źródła elektronów w zakresie prądu Schottky'ego, wyrażony za pomocą struktury źródeł prądowych i rezystorów. W oparciu o przyjęty model uzasadnia jednowymiarowy rozkład natężenia prądu katody wyrażony w funkcji zmiennej uogólnionej i metodę konwersji natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie, w oparciu o wielkości mierzone w obwodzie zasilania katody. Względny błąd konwersji

wyznacza w funkcji pracy wyjścia elektronu materiału katody, dla zadanych wartości natężenia prądu termoemisji elektronowej i tolerancji rezystorów pomiarowych. Niniejszy rozdział ma charakter poznawczy, Autor zaprezentował właściwości, niestosowanej dotychczas, w świetle przeglądu literatury, metody pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody, w tym wyniki analizy niedokładności przetwarzania, które w praktyce determinują tolerancję rezystorów pomiarowych oraz materiał katody w zakresie pracy wyjścia elektronu.

Uzyskane rezultaty badań modelowych stały się podstawą do implementacji algorytmu przetwarzania w układzie elektronicznym, dla którego Autor przyjął nazwę przetwornik katodowy natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie. Projekt układu jest przedstawiony w rozdziale szóstym. Do realizacji przetwarzania multiplikatywno-addytywnego sygnałów napięciowych wprost proporcjonalnych do wartości natężenia prądu katody, Autor wykorzystuje konfigurację wzmacniaczy pomiarowych o regulowanym wzmacnieniu różnicowym, przy czym wyznacza błąd względny napięcia wyjściowego spowodowany wpływem wzmacnienia sumacyjnego i przedstawia adekwatny układ korekcji.

Rozdział siódmy prezentuje doświadczalne badania opracowanego przetwornika, w tym charakterystykę statyczną konwersji, odpowiedzi skokowe natężenia prądu termoemisji elektronowej dla zadanych wartości natężenia prądu termoemisji elektronowej i wyznaczone na tej podstawie parametry dynamiczne transkonduktancji oraz charakterystykę statyczną natężenia prądu termoemisji elektronowej w funkcji napięcia referencyjnego w przykładowym układzie stabilizacji. Wyniki badań doświadczalnych potwierdzają rezultaty analizy modelowej.

Rozdział ósmy prezentuje podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań modelowych i weryfikacji eksperymentalnej metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w przyrządach pomiarowych, które uzasadniają stwierdzenie, że cel pracy został osiągnięty i teza pracy została uzasadniona.

**Oryginalność naukowa.** Rozprawa doktorska odwzorowuje proces poznawczy realizowany przez Autora, zaczynając od wnikliwej analizy zjawiska

termoemisji elektronowej i na tej podstawie stworzenie oryginalnego modelu statycznego termoemisyjnego źródła elektronów w zakresie prądu Schottky'ego, poprzez wyznaczenie, na jego podstawie, rozkładu natężenia prądu katody, uzasadnienie przyjętej metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody, modelowym zbadaniu właściwości metody, w tym ocenie niedokładności konwersji natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie  $i$ , w końcowym etapie, implementację algorytmu pomiarowego w układzie przetwornika katodowego i weryfikację doświadczalną. Rozprawa doktorska odpowiada na pytanie jakie są uwarunkowania metrologiczne metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody oraz obszar jej zastosowań. Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy należy uznać:

- dokonanie oceny stanu wiedzy w przedmiotowym zakresie i wykazanie potrzeby realizacji pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej względem potencjału katody, dla narzędzi pomiarowych wykorzystujących w szczególności wysokie energie elektronów,
- uzasadnienie rozkładu natężenia prądu wzdłuż katody, w oparciu o autorski model statyczny termoemisyjnego źródła elektronów w zakresie prądu Schottky'ego,
- oszacowanie niedokładności konwersji multiplikatywno-addytywnej sygnałów napięciowych wprost proporcjonalnych do natężenia prądu katody,
- zaprojektowanie przetwornika katodowego z kompensacją wpływu tolerancji rezystorów pomiarowych na dokładność konwersji natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych, których wyniki potwierdzają postawioną tezę naukową rozprawy.

Realizacja przedstawionego celu wymagała od Autora wykazania się szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny rozprawy oraz biegłą obsługą narzędzi projektowych. Przedstawiono w sposób wzorcowy metodologię charakterystyczną dla tego typu problemów. Zaprezentowane przez Doktoranta rozważania ukazują,

że opanował on naukowy warsztat pracy i posiadał umiejętności formułowania problemów naukowych i właściwy sposób ich rozwiązywania.

**Stopień rozwiązania zagadnienia**, biorąc pod uwagę temat i cel, praca w pełni odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim z dziedziny pomiarów odcinka czasu. Na podkreślenie zasługuje przyjęta metodologia badań, wychodząca od dobrego rozeznania literaturowego w zakresie realizowanej pracy i prowadząca do pełnej weryfikacji doświadczalnej. W działaniach tych Autor wykazał się znajomością i prawidłowym wykorzystaniem współczesnych technik badawczych. Zaprezentowany w pracy sposób postępowania świadczy o dojrzałości naukowej doktoranta. Biegłość w stawianiu hipotez, przejrzystość i logika zaprezentowanych analiz, konsekwencja w rozwiązywaniu trudnych problemów konstrukcyjnych, krytyczna ocena uzyskiwanych wyników, konsekwencja w realizacji eksperymentu, to obraz umiejętności jakie prezentuje doktorant przedkładaną do oceny rozprawą.

**Układ treści i opracowanie redakcyjne** odzwierciedlają przyjętą metodologię badań, co przyczynia się do przejrzystości pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem. Poziom edytorski odpowiedni dla prac doktorskich.

**Uwagi krytyczne.** Nie mam uwag krytycznych. Z wielkim zainteresowaniem zapoznałem się z tą rozprawą. Pozwalam sobie przedstawić kilka problemów do dyskusji i pytania.

1. W rozdz. 5.1 Doktorant przedstawia zależność względnej długości strefy izotermicznej w funkcji długości katody, dla zadanych wartości natężenia prądu katody, natomiast dla modelu statycznego termoemisyjnego źródła elektronów w zakresie prądu Schottky'ego, przyjmuje założenie o izotermiczności katody. Czy Doktorant analizował możliwość uzmiennienia parametrów modelu w zależności od wartości względnej długości strefy izotermicznej katody?
2. Czy Doktorant rozważał zagadnienie powtarzalności wyników przetwarzania natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie dla danego punktu pracy źródła elektronów?

3. Jaki jest wpływ współczynnika termicznego rezystancji rezystorów pomiarowych (rezystorów mocy) oraz nieliniowości charakterystyki statycznej wzmacniaczy pomiarowych na niedokładność przetwarzania przetwornika katodowego?
4. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w Tabeli 5.3, dla danego przetwornika o ustalonej pracy wyjścia elektronu materiału katody, względny błąd przetwarzania zmienia się wraz ze zmianą natężenia prądu termoemisji elektronowej. Proszę skomentować tę zależność w aspekcie zastosowań praktycznych przetwornika katodowego w układzie stabilizacji.
5. Wpływ jakich źródeł niedokładności przetwarzania może być zredukowany poprzez realizację cyfrową przetwornika katodowego?

Dokonując **ogólnej oceny pracy** stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgra inż. Dariusza Kusia jest pracą bardzo wartościową, stojącą na odpowiednim poziomie naukowym. Autor wykazał się dobrą znajomością metodologii i techniki prowadzenia badań eksperymentalnych w obszarze pomiarów termoemisji elektronowej, gdzie na rzeczywistym obiekcie, pokazał pełną gamę złożonych narzędzi naukowego poznania. Praca zawiera szereg wymienionych wcześniej elementów oryginalnych. Cel pracy został osiągnięty, a postawiona na wstępie teza w swym wymiarze naukowym i technicznym została udowodniona.

Reasumując uważam, że rozprawa doktorska pt. „Metoda detekcji termoemisji elektronowej w próżniowych przyrządach pomiarowych” spełnia wymogi jakie stawia rozprawom doktorskim Ustawa o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Dariusza Kusia do publicznej obrony przedłożonej pracy.

Wrocław, 3 marca 2021 r.



