

Prof. dr hab. inż. Jan Dorosz

Politechnika Białostocka

Wydział Elektryczny

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Kusia p.t.: „Metoda detekcji prądu termoemisji elektronowej w próżniowych przyrządach pomiarowych”

Rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Kusia poświęcona jest problemom związanym z detekcją prądu termoemisji elektronowej w próżniowych przyrządach pomiarowych o źródłach elektronów pracujących w zakresie prądu Schottky’ego, gdzie wraz ze wzrostem napięcia przyspieszającego wzrasta natężenie prądu termoemisji elektronowej. Licząca 95 stron, staranna edytorsko praca jest podzielona na 8 logicznie następujących po sobie rozdziałów. Zawiera ona, poprzedzoną zestawieniem stosowanych oznaczeń i skrótów, analizę stanu wiedzy (rozdziały 2-4) oraz badania własne (rozdziały 5-8). Układ pracy jest poprawny - pozwala na jednoznaczną ocenę własnych osiągnięć jej Autora.

Bardzo wąska i specyficzna tematyka prowadzonych badań, pomimo większego zainteresowania ośrodków badawczych zagadnieniami emisji polowej (emisji zimnej) jest nadal aktualna. Termoemisyjne źródła elektronów to w dalszym ciągu ważne podzespoły urządzeń funkcjonujących na zasadzie oddziaływania wiązki elektronów z materią.

Termoemisyjne źródła elektronów są niewątpliwie konkurencyjne w porównaniu z rozwiązaniami urządzeń na bazie emisji zimnej. W szczególności dotyczy to prostoty ich konstrukcji, a co za tym idzie i niskiej ceny urządzeń, których są elementami. Jednakże, stabilizacja natężenia prądu termoemisji elektronowej w tych urządzeniach pracujących w zakresie prądu Schottky’ego jest konieczna, ponieważ warunkuje ich dokładność i powtarzalność wyników. Wymaga to porównania natężenia prądu termoemisji z sygnałem wzorcowym. W znanych rozwiązaniach układów stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej pomiar natężenia prądu jest realizowany w obwodzie anody i poprzez sprzężenie zwrotne (połączenie galwaniczne, lustro prądowe, łącze optoelektroniczne) jest przekazywany do niskonapięciowego obwodu sterowania katody. Te rozwiązania mają swoje ograniczenia, które przedstawił Autor we wstępie rozprawy. W szczególności, dotyczą one konstrukcji przyrządów pracujących z wykorzystaniem wysokoenergetycznych elektronów. Konieczność transferu informacji z wysokonapięciowego obwodu anodowego do niskonapięciowego obwodu

katody z eliminacją znanych ograniczeń uzasadnia celowość badań, których wyniki przedstawiono w tej rozprawie. Dlatego, zagadnienia związane z zapewnieniem stabilności natężenia prądu termoemisji, a co za tym idzie, dokładności parametrów pracy przyrządów pracujących z wykorzystaniem termoemisyjnych źródeł elektronów są ważne i godne rozprawy doktorskiej. Uważam, że zagadnienia naukowe będące przedmiotem tej pracy są aktualne zarówno z naukowego jak i z praktycznego punktu widzenia.

Już w wprowadzeniu (rozdz. 1) mgr inż. Dariusz Kuś podał tezę:

„Przetwarzanie multiplikatywno-addytywne sygnałów napięciowych wprost proporcjonalnych do wartości natężenia prądu anody umożliwia pomiar natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilana katody”,

oraz cel pracy:

„Analiza modelowa i weryfikacja eksperymentalna metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody”.

Ponadto, na stronie 28 rozprawy jej Autor ponownie informuje, że: *„, celem naukowym rozprawy są badania modelowe i eksperymentalne metody pomiaru natężenia prądu emisji elektronowej w obwodzie zasilania katody umożliwiającej eliminację ujemnego sprzężenia zwrotnego między wysokonapięciowym obwodem anody i niskonapięciowym obwodem katody w układach stabilizacji natężenia prądu termoemisji przeznaczonych dla narzędzi pomiarowych wykorzystujących wysokoenergetyczne elektrony”*.

Zarówno teza jak i cel pracy wynikają z analizy aktualnego stanu wiedzy przeprowadzonej w oparciu o obszerną literaturę, obejmującą 83 pozycje (w tym 4, to współautorskie publikacje Autora), co pozwala twierdzić, że Autor dysponuje odpowiednią wiedzą przedmiotu. Przedmiotem rozprawy jest rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego, polegającego na:

1. Modelowych badaniach metody pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania anody.
2. Opracowaniu projektu katodowego przetwornika natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie.
3. Wykonanie prototypu przetwornika.
4. Doświadczalnej weryfikacji parametrów przetwarzania przetwornika.
5. Praktycznym wykorzystaniu wyników badań - zastosowanie opracowanego przetwornika w układzie stabilizacji natężenia prądu termoemisji.

W pierwszej części (rozdział 2) recenzowanej pracy mgr inż. Dariusz Kuś scharakteryzował zjawisko termoemisji elektronowej. Podał podstawowe zależności je opisujące, poświęcając szczególną uwagę budowie i zasadzie działania termoemisyjnego źródła elektronów, co ściśle wiąże się z tematem rozprawy.

Podobnie, w rozdziale 3 scharakteryzował całkowity przekrój czynny na rozpraszanie elektronów – parametr pozwalający ilościowo opisywać oddziaływanie elektronów z cząsteczkami substancji. Jest to wielkość istotna z punktu widzenia tematyki pracy, ponieważ podczas przenikania wiązki elektronów przez badaną warstwę jej część ulega rozproszeniu, przez co natężenie prądu elektronowego zmniejsza się. Ponadto, natężenie prądu przy komorze zderzeń spektrometru zależy także od natężenia prądu termoemisji generowanego przez katodę, zmieniającego się w trakcie długotrwałych badań (spadek zdolności emisyjnych katody). Dlatego, pomiar i stabilizacja natężenia prądu termoemisji elektronowej jest niezbędna. Dokonał też przeglądu zastosowań termoemisyjnych źródeł elektronów w próżniowych przyrządach pomiarowych takich jak: próżniomierz jonizacyjny z gorącą katodą, rentgenowska spektroskopia fotoelektronów, spektroskopia elektronów Augera, z którego jednoznacznie wynika, że stabilizacja prądu termoemisji elektronowej jest konieczna, bowiem decyduje o dokładności i powtarzalności wyników pomiarów.

Rozdział czwarty to analiza znanych układów stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej funkcjonujących w wyniku pomiaru natężenia prądu termoemisji w obwodzie zasilania anody i związanych z tym ograniczeń w stosowaniu galwanicznego połączenia wysokonapięciowego obwodu anody z niskonapięciowym obwodem katody, a także zapewniających wprowadzenie galwaniczną izolację łączy optycznych (transoptory, światłowody) lecz wymagających konwersji sygnału, co ujemnie wpływa na dynamiczne parametry układu oraz poziom stabilizacji natężenia termoemisji elektronowej.

W rozdziale piątym mgr inż. Dariusz Kuś przedstawił własne wyniki badań modelowych metody pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody – w tym, własny model statyczny termoemisyjnego źródła elektronów. Dokonał szczegółowej analizy rozkładu temperatury katody wolframowej. Na jej podstawie możliwe stało się obliczenie rezystywności oraz maksymalnej gęstości prądu termoemisji dla każdego z elementów na jakie podzielono katodę oraz, przy założeniu symetrii badanego układu, także natężenia prądu emisji i temperatury w funkcji odległości od geometrycznego środka katody.

Badania modelowe zrealizował Autor przyjmując parametry odpowiadające rzeczywistej katodzie stosowanej w głowicy jonizacyjnej GW-11 próżniomierzy jonizacyjnych ($l=0,045\text{ m}$, $d=0,0012\text{ m}$). Wyniki analiz modelowych posłużyły Autorowi do opracowania projektu prototypowego przetwornika I_e / U (natężenie prądu emisji/ napięcie), którego opis zawiera rozdział 6.

Istotnym elementem zaproponowanego tu rozwiązania jest to, że niezależnie od wzajemnej relacji włączonych szeregowo w obwód zasilania katody rezystorów pomiarowych R_1 i R_2 , istnieje możliwość zrównoważenia układu przetwornika poprzez dobór współczynnika wzmocnienia k_{r2} opisanego zależnością (6.8).

Mgr inż. Dariusz Kuś dokonał eksperymentalnej weryfikacji, wykonanego na bazie wzmacniaczy pomiarowych firmy Analog Devices (AD620 i AD8221) prototypu przetwornika. Te cechujące się dużą dokładnością wzmacniacze wymagają jedynie zewnętrznego rezystora. Wyznaczył zatem zależność opisującą wartość rezystora R_G ustalającego wzmocnienie wzmacniacza pomiarowego WP_2 (zależność 6.13). Na tej podstawie, zakładając skrajnie niekorzystny rozrzut tolerancji rezystorów R_1 i R_2 określił zakres zmienności wartości rezystora R_{G2} warunkującego zachowanie niezależności napięcia wyjściowego od natężenia prądu wpływającego do katody I_{K1} (zależność 5.63), a w konsekwencji zależność napięcia wyjściowego od natężenia prądu emisji elektronowej. Wyznaczył też zależność opisującą wielkość całkowitego błędu bezwzględnego spowodowanego wzmocnieniem wspólnego sygnału przez wzmacniacze WP_1 i WP_2 . Dla rzeczywistego układu z katodą wolframową ($0,045m/0,00012m$) podał błędy względne powodowane wzmocnieniem wspólnego sygnału przez wzmacniacze WP_1 : -3% i WP_2 : +0,42%. Częściowo te błędy kompensują się.

Ponadto, Autor zaproponował układ korekcji wpływu wzmocnienia napięcia wspólnego na sygnał wyjściowy wzmacniacza pomiarowego (Rys. 6.3), sprawiający, że poprzez dobór rezystorów R_{13} i R_{14} napięcia wyjściowe wzmacniaczy będą zawierały jedynie wzmocnioną składową różnicową.

W rozdziale 7 określone zostały parametry dynamiczne układu termoemisyjnego źródła elektronów oraz charakterystyki statyczne opracowanego przetwornika prądu termoemisji elektronowej na napięcie (I_e / U). W tym pierwszym przypadku rejestrowano odpowiedź w postaci natężenia prądu termoemisji źródła elektronów na skokową zmianę napięcia zasilającego to źródło. Na podstawie otrzymanych wyników Autor wyznaczył transmitancję operatorową badanego źródła o cechach obiektu inercyjnego wyższego rzędu. W dalszych badaniach słusznie uznał, że otrzymane wyniki odpowiadają obiektom inercyjnym pierwszego rzędu z opóźnieniem. Na podstawie odpowiedzi natężenia prądu termoemisji na skokową zmianę napięcia zasilania wyznaczone zostały stałe czasowe dla katody wolframowej bez rezystorów pomiarowych, a następnie z rezystorami pomiarowymi o wartościach odpowiednio 0,383 i 1,0 Ohm. Z kolei, określony został wpływ napięcia katody oraz natężenia prądu termoemisji, a także szeregowo z katodą włączanych rezystorów, na stałą czasową T modelu inercyjnego I-go rzędu z opóźnieniem. Wyznaczone też zostały statyczne parametry opracowanego przetwornika natężenia prądu termoemisji na napięcie dla katod wolframowej i irydowej pokrytej tlenkiem itru. We wszystkich analizowanych przypadkach uzyskano liniowe charakterystyki przetwarzania natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie przetwornika (max. względny błąd nieliniowości nie przekracza 2,93%). Eksperyment potwierdził poprawność przyjętego algorytmu przetwarzania sygnałów napięciowych wprost proporcjonalnych do natężenia prądu katody.

Autor zaproponował też sposób wykorzystania przetwornika w układzie stabilizacji prądu termoemisji elektronowej o liniowej zależności prądu termoemisji od napięcia (Rys. 7.22) jako jedną z wielu możliwości wykorzystania opracowanego przetwornika w układach stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej. Zastosowanie opracowanego przetwornika w obwodzie zasilania katody zapewnia niezależny dobór napięcia zasilającego anodę, co potwierdza jego przydatność w wysokonapięciowych stabilizatorach prądu termoemisji elektronowej.

Postawione zadanie mgr inż. Dariusz Kuś rozwiązał w sposób oryginalny, wykazując tym samym bardzo dobre przygotowanie do samodzielnego rozwiązywania zagadnień zarówno teoretycznych, jak też związanych z praktyczną realizacją eksperymentu. Potwierdził to poprzez działania mające na celu udowodnienie postawionej tezy.

Jako oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- wyznaczenie rozkładu gęstości natężenia prądu termoemisji elektronowej wzdłuż katody,
- opracowanie modelu termoemisyjnego źródła elektronów dla zakresu prądu Schottky'ego,
- opracowanie i budowę prototypowego przetwornika katodowego pozwalającego na praktyczną weryfikację przeprowadzonych teoretycznych analiz,
- badania modelowe opracowanej metody pomiaru natężenia prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody,
- wyznaczenie w drodze eksperymentu charakterystyk przetwarzania natężenia prądu termoemisji elektronowej na napięcie w obwodzie zasilania katody.

W tym miejscu należy wskazać na wyjątkowo staranną i szczegółową realizację pomiarów, analizę uzyskanych wyników oraz ocenę niepewności pomiarów.

Wszystko to stanowi wartościowy dorobek Autora i czyni rozprawę znaczącą w zakresie badań, projektowania i wytwarzania układów stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej dla aparatury pomiarowej działającej z wykorzystaniem wysokoenergetycznych wiązek elektronów. Przyjęte w rozprawie założenia są uzasadnione, właściwy dobór metod badawczych i pomiarowych oraz wnioski wynikające z wykonanej pracy pozwalają stwierdzić, że postawione Autorowi zadanie zostało rozwiązane poprawnie, a cel rozprawy osiągnięty.

Uwagi wynikające z lektury rozprawy:

1. Uważam, że celem pracy (odpowiadającym tytułowi rozprawy) powinno być: *opracowanie metody detekcji prądu termoemisji elektronowej w obwodzie zasilania katody*. Analiza modelowa i weryfikacja eksperymentalna jest drogą do osiągnięcia tego celu.
2. Pewien niedosyt budzi stosunkowo niewielka liczba publikacji Autora związanych z realizowaną rozprawą – w szczególności, brak tych o międzynarodowym zasięgu.
3. Byłoby cenne wskazanie kierunków dalszych badań.

Powyższe uwagi nie wpływają na wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej, którą oceniam bardzo wysoko. Pan mgr inż. Dariusz Kuś samodzielnie rozwiązał trudny problem naukowo-badawczy, co wymagało zarówno wysokiego zasobu wiedzy teoretycznej, jak też zawansowanych umiejętności eksperymentalnych.

Osiągnięcia poznawcze zaprezentowane w pracy mgr inż. Dariusza Kusia pozwalają mi stwierdzić, że spełnia on wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Białystok, 12.02.2021 r.