

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartłomieja Kocjana  
pt. „Transfery wysokich rezystancji z układem podwójnej izolacji”  
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika  
i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej

### 1. Obszar problemowy rozprawy

Pomiary rezystancji, z którymi bezpośrednio wiąże się tematyka recenzowanej rozprawy, odgrywają ważną rolę w obszarze dokładnych pomiarów wielkości elektrycznych. Potrzeby związane m.in. z szeroko rozumianym postępem technologicznym jak również z prowadzeniem badań naukowych stymulują rozwój aparatury pomiarowej i powodują, że dostępne na rynku komercyjne przyrządy pomiarowe, takie jak np. wysokiej klasy multimetry umożliwiają już wykonywanie pomiarów rezystancji z bardzo małą niepewnością. Ponadto istnieje duże zapotrzebowanie na rezystory wzorcowe stosowane w pomiarach prądów i napięć stałych jako boczniki czy też elementy rezystancyjnych dzielników napięcia. Należy dodać, że również rezystory wzorcowe stosowane w dokładnych pomiarach przy prądzie przemiennym wymagają często wzorcowania przy prądzie stałym. W celu potwierdzenia właściwości metrologicznych, wymienione narzędzia pomiarowe muszą być okresowo wzorcowane w wyspecjalizowanych laboratoriach akredytowanych, które z kolei muszą zapewnić spójność pomiarową z państwowymi (pierwotnymi) wzorcami utrzymywanymi przez krajowe instytuty metrologiczne (*National Metrology Institute* - NMI).

Pierwotne wzorce rezystancji, odtwarzające jednostkę rezystancji i stosowane już od wielu lat w licznych NMI, budowane są w oparciu o kwantowy efekt Halla (QHE). Również pierwotny (państwowy) wzorzec jednostki rezystancji, funkcjonujący od dawna w Głównym Urzędzie Miar, jest systemem opartym o kwantowy wzorzec rezystancji (*Quantum Hall Resistance* - QHR). Wzorzec ten odtwarza rezystancje o wartościach  $R \approx 6453 \Omega$  lub  $R \approx 12906 \Omega$  z niepewnością względną na poziomie  $10^{-9}$ . Zapewnienie spójności pomiarowej w procesie wzorcowania wymaga przenoszenia jednostki rezystancji odtwarzanej przez wzorzec pierwotny na wzorce niższego rzędu, które są zwykle rezystorami wzorcowymi o wartościach nominalnych będących podwielokrotnością lub wielokrotnością wartości  $1 \Omega$  i mieszczących się w przedziale od mikroomów do setek teraomów. Do przenoszenia jednostki rezystancji z osiąganą aktualnie najmniejszą niepewnością stosowane są kriogeniczne komparatory prądu (*Cryogenic Current Comparator* - CCC). Komparatory te, w postaci komercyjnych systemów pomiarowych, pozwalają zwykle na przenoszenie jednostki miary rezystancji na wzorce o wartościach nominalnych do  $100 \text{ k}\Omega$  z niepewnością względną rzędu  $10^{-8}$ . W przypadku wzorców o większych wartościach rezystancji do przenoszenia jednostki miary rezystancji stosowane są wysokoomowe transfery rezystancji. Transfery te są liczalnymi wzorcami stosunku rezystancji o wartościach 1:10 i 1:100.

Rybski

Prace nad rozwojem wysokoomowych transferów rezystancji prowadzone są głównie przez wiodące NMI, rzadziej w placówkach akademickich. Natomiast w Polsce prace w tym obszarze są od kilkunastu lat prowadzone przez zespół prof. Michała Lisowskiego z Politechniki Wrocławskiej. W tej sytuacji, poniekąd naturalnym wydaje się podjęcie w zespole, którego członkiem jest Autor ocenianej rozprawy, prac badawczych zmierzających do budowy kolejnej wersji transferów wysokoomowych o poprawionych właściwościach metrologicznych w stosunku do wcześniejszej wersji, opracowanej przez zespół badawczy z Politechniki Wrocławskiej i wdrożonej w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie.

Uwzględniając przedstawione wyżej argumenty uważam, że podjęte w recenzowanej pracy doktorskiej badania naukowe, których celem jest opracowanie transferów rezystancji z podwójną izolacją, przeznaczonych do dwutorowego systemu przekazywania jednostki miary, i którego realizacja wymaga udowodnienia postawionej w pracy następującej tezy (str. 13 pracy): „Dokładna ocena metrologiczna transferów dużych rezystancji z układem podwójnej izolacji jest możliwa za pomocą cyfrowej analizy symulacyjnej i badań opartych na pełnych modelach zastępczych. Wyniki tej analizy mogą być podstawą do skonstruowania (lub modernizacji) transferów dużych rezystancji o optymalnych parametrach oraz oceny ich dokładności.” są aktualne i ważne oraz mają istotne znaczenie poznawcze i praktyczne.

## 2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje w kolejności spis treści, siedem rozdziałów, w tym wstęp i podsumowanie zawierające wnioski z całej pracy, spis cytowanej literatury (41 pozycji w tym 6, których współautorem jest Autor rozprawy) oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Rozprawa liczy 82 strony numerowane.

Rozdział pierwszy obejmuje wprowadzenie do tematyki pracy z podkreśleniem miejsca transferów rezystancji w łańcuchu przekazywania jednostki rezystancji odtwarzanej przez wzorzec pierwotny (QHR) na wzorce wtórne oraz koncepcję transferów dużych rezystancji z pojedynczą i podwójną izolacją. Na tle charakterystyki aktualnego stanu wiedzy przedstawiono motywację podjęcia badań, którym poświęcona jest rozprawa.

W rozdziale drugim przedstawiono cel i tezę pracy.

Rozdział trzeci poświęcony jest analizie metrologicznej transferów dużych rezystancji i ma ważne znaczenie dla samej rozprawy jak również dla jej oceny, ponieważ zawiera oryginalne wyniki badań Autora. Na wstępie wymieniono główne czynniki wpływające na dokładność transferów dużych rezystancji. Należą do nich: długi czas ustalania się rezystancji, zmiany temperatury i wilgotności w otoczeniu rezystorów, zmiany wartości napięcia na rezystorach, upływność izolacji złączy oraz efekt elektryzacji izolacji złączy. W oparciu o dotychczasową wiedzę i własne doświadczenia związane z konstrukcją transferów Autor wyjaśnia, że skoncentruje się przede wszystkim na zbadaniu wpływu rezystancji izolacji złączy oraz efektu elektryzacji izolacji złączy. W tym celu zaproponowane zostały i przedstawione modele, w postaci schematów zastępczych, transferów z pojedynczą i podwójną izolacją dla każdej z trzech konfiguracji pracy transferu tzn. w układzie połączenia szeregowego, równoległego i szeregowo-równoległego rezystorów. Prezentowane dotychczas w literaturze przedmiotu wyniki badań były niepełne i opierały się na istotnych założeniach upraszczających. W pracy do oceny wpływu rezystancji izolacji złączy zastosowano metodę symulacji komputerowych z wykorzystaniem środowiska Wolfram SystemModeler oraz Wolfram Mathematica. Wykorzystując

zapropionowaną metodę wyznaczono błędy względne stosunku rezystancji rezystorów transferu w połączeniu szeregowym i równoległym (nominalnie wartość stosunku wynosi 100) oraz w połączeniu szeregowo-równoległym i szeregowym (nominalnie wartość stosunku wynosi 10) dla stopniowo obniżanych wartości rezystorów w gałęzi ochronnej (w przypadku transferów z podwójną izolacją). Najważniejszy wniosek z badań wskazuje, że obniżenie wartości nominalnej rezystancji w gałęzi ochronnej transferu o dwa rzędy wielkości istotnie obniża wpływ rezystancji izolacji złączy na dokładność transferu, zwłaszcza dla transferów o bardzo dużych rezystancjach. Ten wynik badań ma również ważne znaczenie praktyczne. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że w pracy nie wyjaśnia się dlaczego przyjęto właśnie taki kierunek badań (dotyczący wartości rezystancji rezystorów w gałęzi ochronnej). Zapropionowaną metodę symulacji komputerowych zastosowano również do zbadania wpływu zmian wartości rezystancji izolacji złączy oraz ich elektryzacji na dokładność transferów. Zbadanie tego ostatniego efektu wymagało rozbudowy schematu zastępczego transferu o źródła prądowe reprezentujące prądy deelektryzacji, których wartości wcześniej Autor wyznaczył eksperymentalnie.

Rozdział czwarty poświęcony jest w całości konstrukcji transferów rezystancji z układem podwójnej izolacji, przeznaczonych do zbudowania dwutorowego systemu przekazywania jednostko miary rezystancji. Zgodnie z przyjętymi w pracy założeniami oznaczało to modernizację trzech z pięciu istniejących transferów tworzących tor I ((0,1-1-10) G $\Omega$ , (10-100-1000) G $\Omega$ , (1-10-100) T $\Omega$ ) oraz budowę trzech transferów wchodzących w skład II toru ((10-100-1000) M $\Omega$ , (1-10-100) G $\Omega$ , (0,1-1-10) T $\Omega$ ). W przypadku modernizowanych transferów zakres wprowadzanych zmian obejmował dobór rezystorów do gałęzi ochronnej oraz sposób rozmieszczenia rezystorów w gałęzi głównej i ochronnej. Podobne zadania należało rozwiązać w przypadku nowych transferów, rozszerzone o dobór rezystorów do gałęzi głównej. Dobór rezystorów o wartościach rzeczywistych (zmierzonych) rezystancji najmniej odbiegających od wartości nominalnej do gałęzi głównej ma kluczowe znaczenie dla dokładności transferu. Ze względu na wpływ rezystancji izolacji złączy, znaczenie ma również rozrzut rezystancji rezystorów w gałęzi ochronnej oraz sposób rozmieszczenia rezystorów (kolejność szeregowo połączonych rezystorów) zarówno w gałęzi głównej jak i ochronnej. Znane z dotychczasowych publikacji podejście dotyczące rozmieszczenia rezystorów opierało się na założeniach upraszczających, zakładających m.in. brak rozrzutu wartości rezystorów zarówno w gałęzi głównej jak i pomocniczej. Autor zbadał wymienione zagadnienie stosując opracowane przez siebie modele symulacyjne. Wykazał m.in., że poprawny dobór i rozmieszczenie rezystorów w gałęzi pomocniczej, z uwzględnieniem ich wartości rzeczywistych może zmniejszyć wartość błędów względnych odtwarzania stosunku rezystancji przez transfer nawet o dwa rzędy wielkości. Podobne podejście zastosował Autor opracowując konstrukcję trzech nowych transferów. W tym przypadku badania symulacyjne pozwoliły m.in. na porównanie wpływu na dokładność transferów rozrzutu wartości rezystancji rezystorów w gałęzi głównej z wpływem upływności izolacji.

W rozdziale piątym przedstawiono poprawne wartości stosunku rezystancji odtwarzanych przez opracowane transfery. Jak już wcześniej wspomniano transfer jest liczącym wzorcem stosunku rezystancji. Odtwarzaną wartość stosunku rezystancji można wyznaczyć znając wartości rezystancji rezystorów tworzących transfer. W omawianym rozdziale podane zostały poprawne wartości stosunków rezystancji odtwarzanych przez 6 transferów z podwójną izolacją. Wartości te wyznaczono uwzględniając poprawki obliczone z uwzględnieniem wyznaczonych eksperymentalnie rozrzutów wartości rezystancji użytych rezystorów. Wyznaczono też

rozszerzoną złożoną niepewność względną obliczonych wartości poprawnych, uwzględniającą niepewność wyznaczenia poprawek spowodowanych rozrzutem wartości rezystancji, niepewność spowodowaną upływnością izolacji złączy oraz zmianą temperatury rezystorów.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki wstępnych badań opracowanych z udziałem Autora prototypów transferów rezystancji. Badania, przeprowadzone z udziałem Autora wykonano w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie i polegały one na wzorcowaniu rezystorów wzorcowych (wtórnych wzorców rezystancji) z zastosowaniem bazującego na opracowanych transferach systemu dwutorowego. Badania potwierdziły spójność wyników wzorcowania przeprowadzonych za pomocą transferów I i II toru.

Rozprawę zamyka podsumowanie, w którym Autor wymienia najważniejsze oryginalne osiągnięcia oraz formułuje najważniejsze wnioski.

Dokonując merytorycznej oceny całej rozprawy stwierdzam, że jest ona napisana na dobrym poziomie merytorycznym. Zawiera właściwie sformułowany i ważny problem naukowy oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autora samodzielnie i z zastosowaniem odpowiedniej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że jej Autor wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania wykorzystując przy tym wiedzę z zakresu metrologii, teorii obwodów, modelowania oraz badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

### 3. Oryginalne osiągnięcia

Udowadniając sformułowaną tezę oraz realizując wyznaczone cele badawcze, Autor rozprawy uzyskał kilka oryginalnych wyników naukowych, do których między innymi zaliczam:

1. Opracowanie modeli wysokoomowych transferów rezystancji z podwójną izolacją, w postaci schematów zastępczych, umożliwiających wszechstronne badanie właściwości metrologicznych transferów rezystancji metodą symulacji komputerowych i tym samym wyznaczenie poprawnej wartości odtwarzanego stosunku rezystancji z mniejszą niepewnością.
2. Przeprowadzenie badań symulacyjnych wpływu upływności izolacji złączy na dokładność odtwarzania stosunku rezystancji przez transfery z podwójną izolacją, które wykazały ograniczenia znanych dotychczas z literatury modeli i pozwoliły zaproponować nowy sposób doboru rezystorów do gałęzi głównych i ochronnych, zapewniający poprawę dokładności transferów.
3. Wykazanie, w oparciu o przeprowadzone symulacje komputerowe, wpływu prądów deelektryzacji, spowodowanych wpływem ładunków przestrzennych gromadzonych w izolacji i zaproponowanie sposobu eliminacji ich wpływu na drodze eksperymentalnej.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe uważam, że Pan mgr inż. Bartłomiej Kocjan zrealizował założony cel badawczy oraz uzasadnił słuszność sformułowanej tezy. Ponadto wykazał się umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem właściwych metod badawczych i na poziomie naukowym odpowiadającym wymaganiom przy realizacji rozpraw doktorskich z nauk

inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie *elektrotechnika*, stanowiącej obecnie część dyscypliny *automatyka, elektronika i elektrotechnika*.

#### 4. Uwagi i komentarze

Podtrzymując pozytywną ocenę całej rozprawy doktorskiej można jednak sformułować następujące uwagi natury ogólnej i szczegółowej:

1. W tezie pracy mówi się, że wyniki przeprowadzonej analizy mogą być podstawą skonstruowania (lub modernizacji) transferów rezystancji o optymalnych parametrach oraz oceny ich dokładności. O ile kwestia oceny dokładności transferów nie budzi wątpliwości, to w pracy nie wyjaśniono jednoznacznie, które z parametrów i w jaki sposób oceniane, miałyby wskazywać, że ten cel został osiągnięty.
2. Oryginalnym osiągnięciem Autora są badania symulacyjne nad wpływem upływności izolacji na dokładność transferów. Obejmowały one m.in. zbadanie skuteczności stosowania gałęzi ochronnej w zależności od wartości rezystancji zastosowanych w niej rezystorów. Badania przeprowadzono dla stosunku rezystancji rezystorów w gałęzi głównej i ochronnej odpowiednio: 1, 10, 100 i 1000. Badania wykazały, że w przypadku transferów z rezystorami o największych wartościach rezystancji w gałęzi głównej, zmniejszenie o dwa rzędy wielkości wartości rezystancji rezystorów w gałęzi ochronnej istotnie zmniejsza błędy transferu. W jaki sposób można wyjaśnić przyjęty zakres tych badań oraz sam efekt zmniejszenia niepewności ?
3. W rozdziale 5 przedstawiono ocenę niepewności wartości poprawnej stosunku rezystancji odtwarzanego przez transfery rezystancji. W ocenie tej uwzględniono trzy składniki niepewności, mianowicie: niepewność wyznaczenia poprawki wynikającej z rozrzutu wartości rezystancji zastosowanych rezystorów, niepewność wynikającą z upływności izolacji oraz wynikającą ze zmiany temperatury rezystorów w transferze. W każdym z wymienionych przypadków wyznaczono błąd graniczny i następnie przyjęto, że wartościom tych błędów odpowiada niepewność rozszerzona na poziomie ufności 0,95. Należałoby wyjaśnić na jakiej podstawie przyjęto takie założenie.
4. W pracy zauważono kilka nieprecyzyjnych określeń, błędów i pomyłek. Do istotniejszych można zaliczyć:
  - a) Str. 4, 3 wiersz od góry, w zdaniu "*To przenoszenie jednostki rezystancji umożliwia skalowanie (wzorcowaniu) materialnych wzorców rezystancji ...*" użyto określenia "skalowanie" ; zgodnie z "Międzynarodowym słownikiem podstawowych i ogólnych terminów metrologii" (wyd. w j. polskim, GUM), określenie "skalowanie" odnosi się do zupełnie innej czynności i nie jest synonimem pojęcia "wzorcowanie". Określenie "skalowanie" pojawia się w kilku miejscach w pracy, natomiast w r. 6, poświęconym wzorcowaniu transferów jest już stosowane wyłącznie poprawne określenie "wzorcowanie".
  - b) Str. 63, wzór (26), w liczniku ułamka jest wpisana liczba 100, powinna być liczba 10.
  - c) Str. 65, nie jest jasne dlaczego we wzorach (27), (28) złożoną niepewność względną oznaczono literą  $W$ , podczas gdy zalecane jest stosowanie litery  $u$  w przypadku niepewności standardowej lub  $U$  w przypadku niepewności rozszerzonej, natomiast w przypadku niepewności względnej  $u_i$ ; w innym miejscu pracy (str. 34) stosowane są zalecane oznaczenia.
  - d) Str. 75, w zdaniu "*W konsekwencji zaproponowano nowy sposób doboru rezystorów do gałęzi głównych i ochronnych, który umożliwia skuteczniejszą minimalizację prądów upływnościowych w porównaniu do zaleceń podawanych w literaturze oraz*

*minimalizację rozrzutu wartości rezystancji rezystorów gałęzi głównych na dokładność transferów.*", chodzi chyba o *minimalizację wpływu rozrzutu a nie minimalizację rozrzutu.*

- e) Str. 75, wiersz 2 od dołu, w zdaniu "Ale i tu do zazębienia się wyników brakuje tylko  $0,8 \times 10^{-6}$  względnej wartości." określenie "zazębienie się wyników" jest określeniem żargonowym, Można to wyrazić np. w następujący sposób: "Do uzyskania zgodności wyników w granicach wyznaczonych niepewności brakuje tylko ..".
  - f) Zauważono następujące błędy literowe: str. 3 wiersz 10 od góry "prawo Ohama", powinno być "prawo Ohma"; str. 19 wiersz 16 od góry "gałęź", powinno być "gałąź", str. 75 wiersz 14 od dołu "między", powinno być między, wiersz 3 od dołu "Uzyskanie" powinno być "Uzyskane".
5. Praca pod względem redakcyjnym jest poprawnie opracowana. Można jedynie wskazać, że korzystniejszym dla czytelnika rozprawy byłoby zamieszczenie w niej wykazu ważniejszych używanych symboli i skrótów oraz powiązanie numeracji wzorów z numerami rozdziałów.

Wyżej wyszczególnione uwagi w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie ujmują i nie podważają w niczym wyniku pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej.

## 5. Podsumowanie

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, że:

**Opiniowana praca doktorska spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Ryszard Rybski