

Kielce, 08.09.2021 r.

Dr hab. inż. Jerzy Augustyn
Katedra Informatyki, Elektroniki i Elektrotechniki,
Politechnika Świętokrzyska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7,
25-314 Kielce
email: j.augustyn@tu.kielce.pl

B. D.	Biuro Dziekana	
	Wpłynęło dnia	10.09.2021
	Nr	283 / zał.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Kubiczka
pt.: „Kalorymetryczny przetwornik wartości skutecznej napięcia przemiennego”

1. Wstęp

Przedłożona recenzja została opracowana na zlecenie Zastępcy Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej, dr. hab. inż. Zbigniewa Kaczmarczyka, prof. PŚ (pismo RD/AEE/80/2020/2021 z dnia 27.07.2021 r.). Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Marian Kampik. Promotorem pomocniczym jest dr inż. Michał Grzenik.

2. Opinia o tematyce i zakresie rozprawy

Dokładny pomiar wartości skutecznej napięcia przemiennego w szerokim paśmie częstotliwości jest istotnym zadaniem w wielu obszarach nauk inżynieryjno-technicznych. Ze względu na możliwość zastosowania kwantowych wzorców napięcia przemiennego jedynie w ograniczonym zakresie częstotliwości, istotnym zagadnieniem jest opracowanie przetwornika wartości skutecznej na napięcie stałe, w paśmie częstotliwości od 10 kHz do 100 MHz. Taka konstrukcja umożliwia wykorzystanie transferu AC-DC do komparacji z wzorcami napięcia stałego. Na podstawie analizy dostępnych danych dotyczących aktualnych wartości różnic transferowych wzorców stosowanych w krajowych instytutach metrologicznych, Autor wykazał, że w zakresie częstotliwości powyżej 1 MHz, spośród stosowanych przetworników termicznych, wymaganą dokładność przetwarzania, mogą zapewnić przetworniki kalorymetryczne (CTVC). Istotną motywacją do podjęcia tematyki wzorców napięcia przemiennego jest stosunkowo duża wartość niepewności polskiego wzorca państwowego. Doktorant, na podstawie analizy konstrukcji stosowanych przetworników termicznych, słusznie wybrał, jako punkt odniesienia do opracowania konstrukcji przetwornika, wzorzec kalorymetryczny opracowany w National Research Council (NRC) w Kanadzie. Uzyskanie odpowiednio małych wartości różnicy transferowej wymagało opracowania modelu matematycznego wzorca CTVC, a następnie weryfikacji jego

poprawności metodą analityczną w środowisku Matlab oraz numerycznie - z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Takie dwutorowe podejście zapewniło z jednej strony uzyskanie optymalnej z punktu widzenia parametrów metrologicznych konstrukcji przetwornika, z drugiej - jednoczesną weryfikację poprawności opracowanego modelu matematycznego. Otrzymana w wyniku takiej analizy konstrukcja przetwornika jest oryginalnym osiągnięciem Autora o potencjalnie dużym znaczeniu dla poprawy dokładności polskiego wzorca napięcia przemiennego, a także dostępnych na świecie wzorców w zakresie częstotliwości do 100 MHz. Zastosowany w pracy sposób rozwiązania problemu obejmujący zastosowanie metody elementów skończonych do analizy zagadnień wymiany ciepła poprzez konwekcję, radiację i przewodnictwo oraz zjawisk związanych z rozkładem pola elektromagnetycznego, w tym zjawiska promieniowania elektromagnetycznego, umożliwił opracowanie bilansu niepewności wykonanych modeli fizycznych przetworników. Poprawność modelu matematycznego została zweryfikowana eksperymentalnie poprzez pomiar różnicy transferowej względem przetworników wzorcowych. Właściwe połączenie metod analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych w pełni potwierdziło założoną przez Autora tezę o możliwości zbudowania kalorymetrycznego przetwornika napięcia przemiennego o małym błędzie rewersji i niepewności różnicy transferowej lepszej lub co najmniej porównywalnej z niepewnościami najdokładniejszych wzorców pierwotnych napięcia przemiennego w paśmie częstotliwości od 1 MHz do 100 MHz.

3. Przegląd i ocena treści rozprawy

Przedstawiona rozprawa o objętości 142 stron zawiera 9 rozdziałów zasadniczych, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, bibliografię, obejmującą 120 pozycji oraz załącznik o objętości 10 stron, będący opisem stanowisk pomiarowych wykorzystywanych w badaniach wykonanych modeli fizycznych przetworników.

W rozdziale pierwszym Autor omawia zasadę transferu AC-DC, podstawowe źródła błędów przetworników termicznych w czterech podstawowych zakresach częstotliwości, wartości niepewności różnic transferowych osiągnęte w wybranych krajowych instytutach metrologicznych oraz motywację, cel i tezę pracy.

Rozdział drugi, o charakterze przeglądowym, Autor poświęcił przedstawieniu właściwości stosowanych wzorców i przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego, uzasadniając w punkcie 2.5 celowość wyboru przetwornika kalorymetrycznego, charakteryzującego się wyjątkowo małą wartością różnicy transferowej w paśmie częstotliwości 1÷100 MHz. Jednocześnie wskazał na podstawowe wady tego przetwornika, które zamierzał zminimalizować w toku analizy i optymalizacji jego konstrukcji.

Rozdział trzeci zawiera analizę zjawisk fizycznych, zachodzących w przetwornikach kalorymetrycznych, w oparciu o konstrukcję przetwornika opracowanego w NRC. Zaproponowano model termoelektryczny takiego przetwornika i na tej podstawie zbadano wpływ materiału korpusu rezystora mikrofalowego i asymetrii termicznej falowodu na wartość jego błędu rewersji.

W obszernym rozdziale czwartym przedstawiono matematyczny model CTVC, w którym wyróżniono obszar falowodu oraz grzejnika. Podział przetwornika na dwa obszary pozwolił na niezależne zbadanie wpływu zmian parametrów charakteryzujących falowód i rezystor mikrofalowy. Przeprowadzona metodą analityczną analiza wpływu zmian parametrów materiałowych i wymiarów geometrycznych przetwornika na wartość zależnej



od częstotliwości składowej różnicy transferowej, została pozytywnie zweryfikowana metodą elementów skończonych.

W rozdziale piątym Autor przedstawia analizę wpływu budowy czujnika termoelektrycznego oraz mechanizmów przepływu ciepła w zespole grzejnik-czujnik termoelektryczny na czułość termoelementu. Wyniki tej analizy pozwoliły na sformułowanie warunków optymalizujących geometrię grubowarstwowego czujnika termoelektrycznego, poprzez wydłużenie jednego z ramion termoelementu w formie meandra. Z przeprowadzonych badań wynika ponadto możliwość istotnego ograniczenia wpływu zjawiska konwekcji na czułość czujnika termoelektrycznego przez zastosowanie osłon z materiałów nieprzewodzących ciepła i wypełnienie wolnych przestrzeni masą aerożelową.

Kolejne dwa rozdziały rozprawy są opisem konstrukcji dwóch modeli fizycznych przetwornika kalorymetrycznego. Uzyskane w wyniku pomiarów wartości błędu rewersji pierwszego modelu były siedmiokrotnie mniejsze od będącego odniesieniem przetwornika skonstruowanego w NRC, natomiast błąd różnicy transferowej dla częstotliwości 100 MHz był trzykrotnie większy. Znacząco większa okazała się ponadto wartość stałej czasowej tego modelu. Dlatego w kolejnym rozdziale przedstawiono modele symulacyjne, które wskazały na elementy konstrukcyjne przetwornika wpływające w istotny sposób na wartości jego podstawowych parametrów metrologicznych. Zmodyfikowany drugi model fizyczny charakteryzował się już znacząco mniejszą wartością różnicy transferowej i stałej czasowej.

Istotny z punktu widzenia planowanego zastosowania przetwornika bilans niepewności różnicy transferowej dla wybranych wartości częstotliwości został opisany w rozdziale ósmym. Autor rozprawy uwzględnił udziały 14 parametrów modelu matematycznego w złożonej niepewności różnicy transferowej. Oszacowany został wpływ niepewności wymiarów geometrycznych oraz właściwości elektrycznych i magnetycznych falowodu, rezystancji, pojemności i indukcyjności rezystora mikrofalowego, a także rozpraszania mocy w falowodzie, wypromieniowania energii w postaci fali elektromagnetycznej, niewspółosiowości falowodu oraz impedancji połączeń lutowanych. Rozdział kończy porównanie wyników pomiaru różnicy transferowej zmodyfikowanego modelu fizycznego z wartościami obliczonymi oraz uzyskanymi dla przetwornika skonstruowanego w NRC.

Rozdział dziewiąty jest podsumowaniem dokonań Doktoranta - przedstawieniem efektów jego pracy, uzyskanych oryginalnych osiągnięć oraz wniosków z przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych.

Załączona bibliografia zawiera najistotniejsze pozycje z zakresu wzorców wartości skutecznej napięcia przemiennego. Na podkreślenie zasługują trzy publikacje w renomowanych czasopismach z listy JCR, których pierwszym autorem jest mgr inż. Krzysztof Kubiczek. Zawierają one częściowe wyniki badań przeprowadzonych w ramach jego rozprawy doktorskiej.

4. Oryginalne osiągnięcia

Do rozwiązania zagadnienia postawionego w tezie pracy Autor zastosował właściwą metodologię. Na wstępie, po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań, przeprowadził analizę teoretyczną modelu matematycznego przetwornika kalorymetrycznego, uwzględniając wszystkie istotne źródła niepewności. Kolejnym etapem pracy były badania symulacyjne wpływu poszczególnych błędów na dokładność wyznaczenia różnicy transferowej. Na tej podstawie zbudowano model fizyczny przetwornika kalorymetrycznego, którego właściwości

metrologiczne zostały wyznaczone doświadczalnie i porównane z wynikami badań symulacyjnych. Wyniki tych badań pozwoliły na określenie parametrów konstrukcyjnych przetwornika wpływających w istotnym stopniu na wartość różnicy transferowej dla zakresu częstotliwości od 10 MHz do 100 MHz. Zmodyfikowany model fizyczny przetwornika można traktować jako prototyp szerokopasmowego wzorca pierwotnego wartości skutecznej napięcia przemiennego w paśmie częstotliwości $1 \div 100$ MHz, o napięciu wejściowym od 1 V do 3 V. Ze względu na brak możliwości doświadczalnej weryfikacji wartości różnicy transferowej w zakresie częstotliwości od 1 do 100 MHz, z założoną dla skonstruowanego przetwornika niepewnością, Autor sporządził szczegółowy bilans niepewności wykonanego modelu fizycznego.

W przedstawionej pracy należy zauważyć oryginalne osiągnięcia Doktoranta:

- 1) opracowanie matematycznego modelu falowodu współosiowego o zwiększonej stabilności numerycznej w zakresie wysokich częstotliwości,
- 2) opracowanie wielozłączowego czujnika termoelektrycznego o zmniejszonej przewodności cieplnej pomiędzy zimnymi i gorącymi końcami wyprowadzeń,
- 3) zidentyfikowanie źródła dużego błędu rewersji przetwornika opracowanego w NRC i opracowanie konstrukcji przetwornika z falowodem o symetrycznej budowie elektrod, znacząco zmniejszających jego błęd rewersji,
- 4) opracowanie prototypu wzorca wartości skutecznej napięcia przemiennego o 12-krotnie mniejszej niepewności różnicy transferowej dla częstotliwości 1 MHz w porównaniu z polskim wzorcem państwowym,
- 5) opracowanie prototypu wzorca wartości skutecznej napięcia przemiennego o najniższej, spośród dostępnych na świecie, szacowanej niepewności obliczenia różnicy transferowej w paśmie częstotliwości do 100 MHz.

5. Uwagi i komentarze

Przy zachowaniu wysokiej oceny całości rozprawy, jej lektura nasuwa kilka uwag o charakterze ogólnym i szczegółowym:

- 1) Podanie w Tab. 3.1 wartości niektórych wymiarów geometrycznych przetwornika kalorymetrycznego z dokładnością do czterech cyfr znaczących wydaje się przesadne.
- 2) Z postaci wzorów (8.9), (8.14) i (8.15) wynika, że opisują one wartości błędów granicznych różnicy transferowej zdeterminowanych odpowiednio: ciepłem wydzielanym w falowodzie, zjawiskiem promieniowania elektromagnetycznego oraz niewspółosiowością falowodu. Tymczasem Autor nazywa te błędy niepewnościami standardowymi.
- 3) W punkcie 8.3 przeprowadzono badania symulacyjne wpływu równoległego przesunięcia osi symetrii elektrod falowodu na niepewność różnicy transferowej. Czy Autor rozważał również przypadek, gdy podczas wykonywania przetwornika, dochodzi do nierównoległego przesunięcia osi symetrii elektrod falowodu?
- 4) W punkcie 8.5 przedstawiono zależność, na podstawie której wyznaczono złożoną niepewność standardową zależnej od częstotliwości składowej różnicy transferowej. Wzór (8.16) jest słuszny w przypadku, gdy poszczególne składowe niepewności złożonej są statystycznie niezależne. Czy Autor weryfikował niezależność zmiennych losowych związanych z występującymi w tym wzorze niepewnościami?
- 5) We wnioskach z przeprowadzonych badań i analiz Autor sugeruje możliwość opracowania wzorców napięcia przemiennego w paśmie częstotliwości sięgającym co

najmniej 1 GHz. Z jakimi wyzwaniem podczas opracowywania takich wzorców należy się zmierzyć? Jakie są granice wykorzystania wzorców kalorymetrycznych?

W tekście pracy występują również nieliczne uchybienia redakcyjne. Najbardziej istotne z nich wyszczególniono poniżej:

- 1) W zamieszczonych w pracy tabelach przedstawiających wartości niepewności Autor podaje przyjętą wartość współczynnika rozszerzenia k , nie wyjaśniając jego znaczenia, co może budzić wątpliwości u czytelnika spoza kręgu środowiska metrologów.
- 2) Na str. 35 Autor odwołuje się do rys. 3.11, którego zabrakło w tekście pracy.
- 3) W rozdziale czwartym Autor stosuje takie same oznaczenia dla opisu parametrów jednostkowych oraz całkowitych falowodu. Utrudnia to interpretację zawartych tam zależności i prowadzi do pomyłek w oznaczeniach jednostek, np. we wzorach (4.32) i (4.36). Nie wyjaśniono również znaczenia indeksu górnego występującego w punkcie 4.2.2 przy symbolach natężenia pola magnetycznego (H^*) oraz indukcji pola elektrycznego (D^*).
- 4) W załączonej bibliografii Autor nie zawsze konsekwentnie przestrzega przyjętej w pracy konwencji numeracji kolejnych pozycji w kolejności ich cytowania w tekście rozprawy. Dodatkowo pomiędzy pozycjami [50] i [51] zamieszczono pozycję nienumerowaną, a niektóre publikacje, np. pozycje [115]-[120], nie zostały przywołane w tekście.

6. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Zaprezentowana w niej analiza teoretyczna, wyniki badań symulacyjnych i pomiarów, potwierdzają ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz duże umiejętności w zakresie analizy przetworników pomiarowych dużych dokładności i realizacji złożonych badań eksperymentalnych. Autor rozprawy wykazał się również wiedzą i doświadczeniem w zakresie wykorzystania współczesnych technik pomiarowych i narzędzi informatycznych, potwierdzając umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów badawczych na poziomie naukowym odpowiadającym rozprawom doktorskim z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Oceny tej nie podważają przedstawione uwagi i komentarze.

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, wnosząc o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę wysoką wartość merytoryczną przedstawionej pracy oraz uzyskane podczas jej realizacji oryginalne osiągnięcia Autora, potwierdzone również publikacjami jej częściowych wyników w czasopiśmie posiadającym Impact factor, których Doktorant jest pierwszym autorem, wnosząc o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Krzysztofa Kubiczka.

