

Biurowo Dziekana

Wpłynęło dnia 24 09 2021

Nr 304 / zał.

prof. dr hab. inż. Ryszard Rybski
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki

Zielona Góra, 24 września 2021 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Krzysztofa Kubiczka
pt. „Kalorymetryczny przetwornik wartości skutecznej napięcia przemiennego”
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Politechniki Śląskiej

1. Obszar problemowy rozprawy

Pomiary wartości skutecznej napięcia przemiennego, które są przedmiotem recenzowanej rozprawy, odgrywają kluczową 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 narzędzia pomiarowe, takie jak wysokiej klasy multimetry czy karty akwizycji danych o dużej rozdzielczości umożliwiają już wykonywanie pomiarów wartości skutecznej napięć przemiennych z bardzo małą niepewnością w przedziale napięć od pojedynczych miliwoltów do setek woltów w zakresie częstotliwości od pojedynczych herców do dziesiątek megaherców. 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 (NMI).

Pierwotne wzorce wartości skutecznej napięcia przemiennego są, od kilkudziesięciu lat do dnia dzisiejszego, realizowane najczęściej w oparciu o metodę transferu AC-DC (transfer AC-DC), która polega na określeniu mierzonej wartości skutecznej napięcia przemiennego w odniesieniu do znanej wartości napięcia stałego. Transfer AC-DC jest realizowany z zastosowaniem metody termicznej, w której wykorzystuje się termiczne przetworniki wartości skutecznej (TPWS) budowane na bazie czujników termoelektrycznych. Przetworniki te pozwalają na pomiary dokładne wartości skutecznej napięcia w paśmie od ułamków herca do setek megaherców.

Uzupełniając tę wstępną charakterystykę obszaru badawczego dokładnych pomiarów wartości skutecznej napięcia przemiennego, w tym zwłaszcza w odniesieniu do badań nad wzorcami pierwotnymi, należy dodać, że obok prac dotyczących przetworników termicznych prowadzone są od ponad 20 lat, przede wszystkim przez wiodące na świecie NMI, intensywne badania, które doprowadziły do zbudowania tzw. kwantowych wzorców napięcia przemiennego. Wzorce te są cyfrowymi źródłami napięć przemiennych generujących napięcie z wykorzystaniem matrycy złączy Josephsona oraz techniki cyfrowej syntezy częstotliwości. Wartość skuteczna generowanego w ten sposób napięcia jest bezpośrednio powiązana z wartością napięcia stałego odtwarzanego przez kwantowe wzorce napięcia stałego z niepewnością $1 \cdot 10^{-9}$ V/V. Trudne do rozwiązania problemy techniczne powodują, że niepewność odtwarzania wartości skutecznej napięcia przemiennego przez kwantowe źródła jest większa i wynosi $1 \cdot 10^{-7}$ V/V. Podstawowym aktualnie ograniczeniem kwantowych wzorców napięcia przemiennego jest stosunkowo mała

Re.

wartość amplitudy oraz stosunkowo niska częstotliwości generowanych napięć, przy której można jeszcze zapewnić odpowiednio mały poziom niepewności. W przypadku źródeł wzorcowych typu PJAWS (Programmable Josephson Voltage Standard) wykorzystujących programowalne matryce złączy Josephsona generowane są napięcia sinusoidalne o wartości skutecznej rzędu 10 V przy częstotliwości rzędu kilku kHz, natomiast w źródłach JAWS (Josephson Arbitrary Waveform Synthesizer) działające w oparciu o matryce złączy zasilanych impulsowo są to odpowiednio wartości 1 V i 100 kHz. Poza wspomnianymi ograniczeniami są to bardzo kosztowne wzorce.

Zestawienie krótko zarysowanych powyżej wymagań stawianych wzorcom napięcia przemiennego, szczególnie ze względu na pasmo pomiarowe, z aktualnymi możliwościami ich realizacji, wyjaśnia dlaczego od bardzo wielu lat wzorce pierwotne napięcia przemiennego realizowane są na bazie termicznego transferu AC-DC. W związku z tym tematyka dotycząca zastosowania termicznego transferu AC-DC w dokładnych pomiarach napięć przemiennych jest rozwijana od wielu lat i ma bardzo bogatą literaturę, która obejmuje szereg monografii oraz publikacji w prestiżowych czasopismach, poczynając od początku lat pięćdziesiątych XX wieku i kończąc na dniu dzisiejszym. Badania prowadzone są w wielu kierunkach. Do głównego nurtu należą prace związane z doskonaleniem technologii TPWS i metod ich wzorcowania. W paśmie wyższych częstotliwości pomiarowych, w którym bardzo trudno nadać jest wzorcom ich końcowe cechy metrologiczne poprzez porównanie z innym wzorcem, bardzo ważną rolę odgrywają prace zmierzające do opracowania tzw. liczalnego wzorca napięcia przemiennego (dokładniej: wzorca o liczałnej różnicy transferowej). Takie podejście, dobrze znane i stosowane np. w obszarze dokładnych pomiarów impedancji (liczalny kondensator jako wzorzec pojemności elektrycznej, rezystor wzorcowy o liczałnej stałej czasowej) polega na opracowaniu odpowiednio dokładnego modelu matematycznego wzorca i obliczeniu istotnych parametrów metrologicznych wzorca w oparciu o jego wymiary geometryczne, stałe materiałowe i stałe fizyczne. Opracowanie odpowiednio dokładnego modelu matematycznego wzorca bazującego na termicznym transferze AC-DC nie jest zadaniem łatwym ze względu na szereg przebiegających współzależnie zjawisk fizycznych występujących w samym przetworniku termicznym jak i konieczność uwzględnienia parametrów reszkowych i wielkości pasożytniczych występujących w konstrukcji całego wzorca.

Prace nad TPWS prowadzone są głównie przez wiodące NMI, rzadziej w placówkach akademickich. Wyróżniającym się tu wyjątkiem są badania zespołu prof. Mariana Kampika z Politechniki Śląskiej, dzięki którym opracowano m.in. liczalny wzorzec wartości skutecznej napięcia przemiennego pracujący w paśmie do 1 MHz. Bardzo dobre właściwości metrologiczne tego wzorca potwierdzone zostały m.in. poprzez serię przeprowadzonych komparacji międzynarodowych. W tej sytuacji poniekąd naturalnym wydaje się podjęcie w zespole, którego członkiem jest Autor ocenianej rozprawy, prac badawczych zmierzających do budowy wzorca o zakresie częstotliwości rozszerzonym znacząco powyżej 1 MHz. Dodatkowo wagę takich badań wzmacnia fakt, że polska instytucja metrologiczna odpowiedzialna za utrzymanie wzorców państwowych tj. Główny Urząd Miar (GUM) nie posiada własnego wzorca pierwotnego a państwowy wzorzec w zakresie częstotliwości powyżej 1 MHz charakteryzuje się relatywnie dużą niepewnością.

Uwzględniając przedstawione wyżej argumenty uważam, że podjęte w recenzowanej pracy doktorskiej badania naukowe, których celem jest (str. 12 pracy): *„...zbudowanie TPWS, który może pełnić rolę wzorca pierwotnego napięcia przemiennego. Opracowany model matematyczny będzie pozwalać na wyznaczanie składowej różnicy transferowej zależnej od częstotliwości w paśmie częstotliwości od 1 MHz do 100 MHz z możliwie małą niepewnością”* są aktualne i ważne oraz mają istotne znaczenie teoretyczne i praktyczne.

2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje w kolejności spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń, wprowadzenie, siedem rozdziałów zasadniczych, podsumowanie zawierające wnioski z całej pracy, spis cytowanej literatury (120 pozycji obejmujących najważniejsze publikacje odzwierciedlające stan badań w zakresie tematycznym rozprawy) oraz jeden dodatek. Rozprawa w swej zasadniczej części liczy 131 stron numerowanych.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do pracy i przedstawia motywację, cel oraz tezę pracy.

Rozdział drugi zawiera przegląd wybranych rozwiązań konstrukcyjnych wzorców napięcia przemiennego. Scharakteryzowano w i porównano właściwości częstotliwościowe następujących rozwiązań: kwantowe wzorce napięcia przemiennego, termiczne przetworniki jednozłączowe (Single-Junction Thermal Converter, SJTC), planarne termiczne przetworniki wielozłączowe (Planar Multijunction Thermal Converter, PMJTC) oraz kalorymetryczne przetworniki napięcia przemiennego (Calorimetric Thermal Voltage Converter, CTVC). W tym miejscu pojawia się po raz pierwszy odwołanie do dwóch ważnych dla całej rozprawy publikacji, w których przedstawiono odpowiednio budowę i wyniki badań pierwszego ze znanych z literatury liczalnego rozwiązania CTVC, opracowanego w kanadyjskim instytucie metrologicznym (National Research Council, NRC) w latach 1997 - 1999. Można tu dodać, że idea przetwornika składającego się z rezystora mikrofalowego i falowodu była już wcześniej znana w pomiarach mocy w zakresie wielkich częstotliwości. Zamieszczone w pracy porównanie charakterystyk obliczonych różnic transferowych opracowanych dotychczas pierwotnych liczalnych wzorców napięcia przemiennego w paśmie od 1 MHz do 100 MHz (rys. 2.8) jednoznacznie wskazuje na celowość wyboru CTVC jako rozwiązania o najlepszych potencjalnie właściwościach metrologicznych dla częstotliwości do 100 MHz. Przedstawione w podsumowaniu rozdziału wnioski z przeprowadzonej przez Autora szczegółowej analizy wspomnianego rozwiązania są równocześnie ważną wskazówką dla przyjętych w rozprawie kierunków dalszych prac. Do najważniejszych wad opracowanego w NRC rozwiązania zaliczył Autor: stosunkowo duży błąd rewersji, skomplikowaną konstrukcję termoelementu, która utrudnia zapewnienie powtarzalności parametrów tak wykonanych przetworników oraz skomplikowany technologicznie sposób wykonania falowodu. Wskazano również na pewne niedoskonałości modelu matematycznego, które mogą powodować niestabilność obliczeń numerycznych.

W rozdziale trzecim przedstawiono analizę przyczyn powstawania stosunkowo dużej wartości błędu rewersji opracowanego w NRC rozwiązania CTVC. Zadanie to zostało rozwiązane przez Autora w oryginalny sposób, polegający na samodzielnym opracowaniu modelu symulacyjnego zjawisk termicznych i termoelektrycznych w oparciu o opublikowane szczegóły konstrukcyjne oraz informacje uzyskane bezpośrednio od twórców przetwornika z NRC. W budowie modelu zastosowano metodę elementów skończonych a badania przeprowadzono w komercyjnym

środowisku Comsol Multiphysics. Wyniki badań symulacyjnych zostały porównane z opublikowanymi wynikami badań eksperymentalnych wykonanych w NRC. Ich dobra zgodność potwierdziła poprawność modelu symulacyjnego, co pozwoliło Autorowi na przeprowadzenie badań symulacyjnych, których wyniki wskazały m.in., że główną przyczyną relatywnie dużej wartości błędu rewersji jest asymetria termiczna falowodu.

Rozdział czwarty poświęcono budowie modelu matematycznego CTVC, który pozwoli na analityczne wyznaczenie różnicy transferowej - podstawowego parametru przetwornika i tym samym umożliwi osiągnięcie jednego z podstawowych celów pracy tzn. opracowanie liczalnego wzorca pierwotnego, i z tego powodu jest rozdziałem o kluczowym znaczeniu dla rozprawy. Model ten musi uwzględniać wszystkie istotne zjawiska fizyczne zachodzące w przetworniku. Tworząc model matematyczny przyjęto następujące postępowanie: w przetworniku wyodrębniono kluczowe obszary, każdy z nich potraktowano jako czwórnik, przyporządkowując mu odpowiedni schemat zastępczy i opisując za pomocą macierzy łańcuchowej. Model kompletnego wzorca otrzymano w postaci równania połączonych łańcuchowo czwórników. Ze względu na przyjęty zakres częstotliwościowy wszystkie obszary wzorca potraktowano jako układy o parametrach rozłożonych, uwzględniając również zjawisko naskórkowości. Szczególnie wiele miejsca poświęcono modelowaniu dwóch kluczowych elementów przetwornika: falowodu i rezystora mikrofalowego. W celu weryfikacji poprawności złożonego opisu analitycznego falowodu zbudowano również jego model symulacyjny z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Potwierdzeniem poprawności ujęcia analitycznego była bardzo dobra zgodność obliczeń modułu impedancji falowej falowodu uzyskanych w środowisku Matlab (model analityczny) i programie Comsol (metoda elementów skończonych). Metodę elementów skończonych zastosowano również do obliczenia parametrów resztkowych rezystora mikrofalowego (rzęd wielkości resztkowej indukcyjności i pojemności praktycznie uniemożliwia ich pomiar).

Rozdział piąty obejmuje analizę i optymalizację właściwości przetwornika termoelektrycznego - kolejnego obok falowodu i rezystora mikrofalowego kluczowego elementu składowego CTVC. W klasycznym podejściu przetwornik termoelektryczny (czujnik termoelektryczny, czujnik termometryczny) ma postać wielu połączonych szeregowo zgodnie termoelementów - tj. postać wielozłączowego przetwornika termoelektrycznego. Autor we wstępie rozdziału ponownie odwołuje się do konstrukcji CTVC opracowanego w NRC i wskazuje na skomplikowaną technologicznie konstrukcję zastosowanego tam przetwornika termoelektrycznego, która m.in. wymaga manualnego przeprowadzenia kilku istotnych operacji w procesie jego wytwarzania. W tej sytuacji rozważa się zastosowanie technologii cienko- lub grubowarstwowej do wykonania przetwornika termoelektrycznego. Wybrana zostaje technologia grubowarstwowa ze względu na jej prostszą realizację i niższy koszt. W celu opracowania konstrukcji przetwornika i jej optymalizacji opracowany został model symulacyjny przetwornika z zastosowaniem metody elementów skończonych. Model uwzględnia wszystkie zjawiska transportu ciepła zachodzące w zespole grzejnik - czujnik termometryczny. Przedstawiono szereg wyników badań symulacyjnych, dzięki którym zaprojektowano optymalną - przede wszystkim ze względu na czułość - konstrukcję przetwornika termoelektrycznego i na jej podstawie wykonano prototyp wykorzystany do zbudowania kompletnego CTVC.

W rozdziałach szóstym i siódmym przedstawiono konstrukcję dwóch opracowanych przez Autora modeli fizycznych CTVC. W rozprawie nazwano je odpowiednio "pierwszym modelem" (rozdział 6) i "drugim modelem" (rozdział 7). W przypadku obydwu modeli przedstawiono

szczególne konstrukcyjne, udokumentowane m.in. szeregiem odpowiednio dobranych fotografii. Wyznaczono eksperymentalnie podstawowe właściwości modelu pierwszego tj.: termiczną stałą czasową, wykładnik potęgi funkcji przetwarzania oraz błąd rewersji. Obliczono w oparciu o model matematyczny oraz zmierzono charakterystykę częstotliwościową różnicy transferowej. Uzyskane wyniki są zgodne w granicach wyznaczonych niepewności, chociaż należy dodać, że w paśmie powyżej 10 MHz niepewność pomiarów była stosunkowo duża. Porównując uzyskane wyniki z przyjętymi założeniami oraz parametrami przetwornika opracowanego w NRC Autor stwierdza, że uzyskano odpowiednio małą wartość błędu rewersji, natomiast model charakteryzuje się zbyt dużymi wartościami termicznej stałej czasowej i różnicy transferowej. Po dogłębnym przeanalizowaniu możliwych przyczyn nie w pełni zadowalających parametrów modelu pierwszego przedstawiono konstrukcję modelu drugiego. W konstrukcji modelu drugiego wprowadzono kilka istotnych modyfikacji, poprzedzając je każdorazowo odpowiednimi badaniami symulacyjnymi. W rezultacie uzyskano zmniejszenie wartości stałej czasowej o około 80% i zmniejszenie wartości różnicy transferowej o 70% przy 100 MHz.

W rozdziale ósmym przedstawiono budżet niepewności różnicy transferowej opracowanego liczalnego wzorca w postaci CTVC. Podstawą do jego wyznaczenia był przedstawiony w rozdziale 4 model matematyczny. Budżet został rozszerzony o składniki, których nie uwzględnia wspomniany model tj. wpływ nagrzewania falowodu, wpływ promieniowania elektromagnetycznego, wpływ niewspółosiowości falowodu i wpływ impedancji połączeń lutowanych trójnika. Szczególnie istotnym okazało się przeanalizowanie oraz uwzględnienie wpływu niewspółosiowości falowodu - składnika dotychczas pomijanego w znanych z literatury przedmiotu budżetach niepewności różnicy transferowej. Rozdział zawiera, zestawione w postaci tabelarycznej, budżety niepewności dla wybranych częstotliwości pomiarowych. W końcowej części rozdziału przedstawiono wyniki pomiarów różnicy transferowej drugiego modelu fizycznego CTVC, które potwierdziły poprawności opracowanego modelu matematycznego.

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 wysokim 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 bardzo dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania wykorzystując przy tym wiedzę z zakresu metrologii, teorii obwodów, modelowania i badań symulacyjnych oraz metod numerycznych.

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 modelu matematycznego kalorymetrycznego przetwornika wartości skutecznej napięcia przemiennego pozwalającego na wyznaczenie składowej różnicy transferowej zależnej od częstotliwości w paśmie od 1 MHz do 100 MHz,

2. Opracowanie, z zastosowaniem metody elementów skończonych, modelu symulacyjnego zjawisk termicznych i termoelektrycznych w kalorymetrycznym przetworniku wartości skutecznej, który pozwolił m.in. na zidentyfikowanie przyczyny relatywnie dużej wartości błędu rewersji przetwornika,
3. Opracowanie zoptymalizowanego wielozłączonego grubowarstwowego termoelementu o czułości porównywalnej z czułością termoelementów wielozłączowych cienkowarstwowych, o korzystniejszym cenowo i prostszym technologicznie sposobie produkcji,
4. Opracowanie prototypu wzorca wartości skutecznej napięcia przemiennego o najniższej szacowanej niepewności obliczenia różnicy transferowej w paśmie częstotliwości do 100 MHz, ze wszystkich znanych obecnie na świecie wzorców, przedstawionych w dostępnej literaturze przedmiotu i równocześnie charakteryzującego się około 12-krotnie mniejszą wartością różnicy transferowej przy 1 MHz od różnicy transferowej wzorca państwowego w GUM w Warszawie,
5. Opracowanie, bazującego na metodzie elementów skończonych, modelu symulacyjnego falowodu koncentrycznego i wykazanie z jego wykorzystaniem wpływu niekoncentryczności falowodu na zmianę impedancji falowodu, i tym samym na niepewność wyznaczenia wartości różnicy transferowej przetwornika - składowej niepewności nieuwzględnianej wcześniej w budżetach niepewności znanych z literatury rozwiązań.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe uważam, że Pan mgr inż. Krzysztof Kubiczek 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 inżynierjno-technicznych.

4. Uwagi i komentarze

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

1. W rozdziale czwartym przedstawiony został opracowany przez Autora model matematyczny kalorymetrycznego przetwornika wartości skutecznej napięcia, pozwalający na analityczne wyznaczenie różnicy transferowej. Ze względu na złożoność modelu oraz szeroki zakres zmienności wartości występujących w nim wielkości, jego bezpośrednie wykorzystanie do obliczeń obarczone było niestabilnością numeryczną. W związku z tym Autor krótko wymienia zastosowane metody, które pozwoliły uzyskać stabilne rozwiązanie obliczeń numerycznych. Byłoby ważne, żeby bliżej wyjaśnić jaka była istota zastosowanych metod, które pozwoliły rozwiązać problem stabilności obliczeń numerycznych.
2. W rozdziale piątym, poświęconym analizie i optymalizacji właściwości przetwornika termoelektrycznego, rozważa się zastosowanie technologii cienko- lub grubowarstwowej do jego wykonania. Wybrana zostaje technologia grubowarstwowa ze względu na jej prostszą realizację i zdecydowanie niższy koszt. Gdyby pominąć, w pełni uzasadniony, aspekt ekonomiczny przyjętego rozwiązania i zastosować technologię cienkowarstwową, to czy byłoby możliwe poprawienie właściwości metrologicznych tak skonstruowanego CTVC ?

3. W opracowanym modelu fizycznym CTVC zastosowano falowód zbudowany z rurek stalowych. Czy Autor analizował możliwość użycia np. technologii PCB lub może jeszcze innych technologii konstrukcji falowodu ?
4. Błąd rewersji opracowanej przez Autora konstrukcji CTVC został zmniejszony o około 85% w stosunku do konstrukcji kanadyjskiej (NRC). Uzyskano zatem około 7-krotne zmniejszenie tego parametru, nie mniej jednak nadal pozostaje on na poziomie kilkudziesięciu $\mu\text{V}/\text{V}$. Jaka może być tego przyczyna ?
5. Z przedstawionych przez Autora analiz wynika, że zastosowanie rezystora dyskowego zamiast rezystora prętowego może powodować znaczny wzrost pojemności całkowitej grzejnika, co przekłada się na dużą wartość różnicy transferowej. Czy te wyniki analizy zostały potwierdzone eksperymentalnie ?
6. W pracy zauważono kilka błędów i pomyłek. Do istotniejszych można zaliczyć:
 - a) str. 35, w tekście - 5 wiersz od góry - jest odwołanie do rys. 3.11, który powinien ilustrować związek pomiędzy przewodnością cieplną korpusu rezystora mikrofalowego a mocą cieplną doprowadzaną do miedzianego dysku - rysunek ten nie został zamieszczony w pracy,
 - b) str. 57, 7 wiersz od dołu, w zdaniu brakuje czasownika "jest",
 - c) str. 59, wiersz 5 od dołu, w zdaniu rozpoczynającym się od "Łączna ilość elementów siatki ..." powinno być "Łączna liczba elementów siatki ...",
 - d) str. 60, 6 wiersz pod Tabelą 4.3, zamiast "... obliczyć indukcję ...", powinno być "... obliczyć indukcyjność ...",
 - e) str. 95, drugi wiersz powyżej Tabeli 7.1, w zdaniu rozpoczynającym się od "Wyniki pomiaru stałej czasowej przetwornika ...", powinno być "Wyniki obliczeń stałej czasowej przetwornika ...",
 - f) str. 112, pierwszy wiersz od dołu i str. 113, pierwszy wiersz pod Tabelą 8.6 - jest odwołanie do Tabeli 5.6, powinno być odwołanie do Tabeli 8.6.
7. Praca pod względem redakcyjnym jest starannie opracowana, zawiera niewielką liczbę tzw. błędów literowych, a na podkreślenie zasługują bardzo starannie i przejrzyście wykonane wykresy oraz przedstawiona w sposób przemyślany dokumentacja fotograficzna ilustrująca proces budowy opracowanych przez Autora modeli fizycznych CTVC.

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

5. Podsumowanie

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

1. 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.

2. Wnioskuje o wyróżnienie rozprawy, której wysoką wartość merytoryczną starałem się podkreślić w swojej recenzji; dodam, że Autor rozprawy spełnia również konieczny - w przypadku wnioskowania o wyróżnienie rozprawy doktorskiej warunek przyjętego przez Senat Politechniki Śląskiej regulaminu w zakresie nadawania stopnia doktora, który mówi, że niezbędne jest: *"opublikowanie całości lub części wyników rozprawy w formie pracy oryginalnej w recenzowanym czasopiśmie naukowym, posiadającym Impact factor, przy czym kandydat ubiegający się o stopień doktora powinien być pierwszym autorem przedmiotowej publikacji"*. Autor rozprawy ma w swoim dorobku trzy takie publikacje, których listę przedstawiam poniżej.
- **K. Kubiczek**, M. Kampik and M. Grzenik, *Analysis of DC reversal error of the calorimetric thermal voltage converter*, Measurement, vol. 168, 108439, 2021.
 - **K. Kubiczek** and M. Kampik, *Highly accurate and numerically stable matrix computations of the internal impedance of multilayer cylindrical conductors*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 62, no. 1, pp. 204-211, 2020.
 - **K. Kubiczek** and M. Kampik, *Highly accurate and numerically stable computations of double-layer coaxial waveguides*, Engineering Computations, vol. 36, no. 4, pp. 1384-1399, 2019.

Ryszard Rybicki