

Oponentní posudek disertační práce

Uchazeč: Ing. Stanislav Mašláň

Název disertační práce: Metody přesného měření nízkých impedancí

Oponent: Ing. Radek Sedláček, Ph.D.

Pracoviště opONENTA: ČVUT v Praze – FEL, Katedra měření (13138)

Oponent se v posudku vyjádří dle Studijního a zkušebního řádu VUT zejména:

- a) k aktuálnosti tématu disertační práce,*
 - b) zda disertační práce splnila stanovený cíl,*
 - c) k postupu řešení problému a k výsledkům disertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda,*
 - d) k významu pro praxi nebo rozvoj oboru,*
 - e) k formální úpravě disertační práce a její jazykové úrovni,*
 - f) zda disertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona,*
 - g) zda student prokázal nebo neprokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a zda práce splňuje nebo nesplňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru. Bez tohoto závěru je posudek neplatný.*
- Ke každému z níže uvedených bodů je nutno doplnit stručný komentář.*

Ad a) Aktuálnost tématu disertační práce

Téma disertační práce je velmi aktuální.

Komentář: Problematika plně digitálních či vzorkujících čtyřpárových můstků pro navazování etalonů elektrické impedance je velice aktuální téma, o čemž svědčí zejména vědecké publikace (např. [1][2][3]) z této oblasti za posledních 5 let, publikovaných pracovníky předních metrologických institutů (PTB, MTTAS, NLE, ČMI). Zatímco dříve se pro porovnání etalonů na té nejvyšší úrovni používaly transformátorové můstky, dnes tuto úlohu postupně přebírají plně digitální můstky založené na přesných generátorech referenčních střídavého napětí využívající technologie JWS (Josephon waveform synthesizers - střídavý generátor využívající pole Josephsonových kontaktů). Další aktuální možnosti porovnání je právě nasazení digitálních vzorkujících můstků. Potřeba navazování proudových bočníků v širokém kmitočtovém pásmu je zmíněna hned v úvodní kapitole práce. V tomto směru nezbyvá nic jiného než plně souhlasit. Důvodem je hojné nasazení impulzních zdrojů v nejrůznějších el. spotřebičích a nutnosti měřit el. spotřebu nejen pro základní harmonickou, ale i vyšší harmonické složky.

[1] ORTOLANO, Massimo, Martina MARZANO, Vincenzo D'ELIA, et al. A Comprehensive Analysis of Error Sources in Electronic Fully Digital Impedance Bridges. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2021, **70**, 1-14 [cit. 2021-04-07]. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2020.3034115

[2] KUCERA, Jan a Jakub KOVAC. A Reconfigurable Four Terminal-Pair Digitally Assisted and Fully Digital Impedance Ratio Bridge. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2018, **67**(5), 1199-1206 [cit. 2021-04-07]. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2018.2790538

[3] F. Overney and B. Jeanneret, "Impedance bridges: From Wheatstone to Josephson", *Metrologia*, vol. 55, no. 5, pp. S119-S134, Oct. 2018.

Ad b) Splnění stanoveného cíle disertační práce

Cíl disertační práce byl splněn.

Komentář: Mohu konstatovat, že všechny cíle uvedené v kapitole 2 disertační práce byly splněny.

Ad c) Postup řešení problému a výsledky disertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda

Postup řešení problému a výsledky disertační práce jsou vynikající.

Komentář: Pro prostudování disertační práce mohu konstatovat, že doktorand postupoval naprosto korektně při řešení stanovených cílů práce. Hlavní cílem práce byl vývoj a realizace digitální vzorkujícího čtyřpárového můstku určeného primárně pro měření nízkých impedancí ($<10\ \Omega$) v kmitočtovém pásmu minimálně do 1 MHz. V rámci dosažení tohoto cíle doktoranda musel vyřešit celou řadu problémů, jako např.

- eliminaci úbytku na spojovacím linku mezi porovnávanými etalony,
- problém se zatížením svorek HP obou porovnávaných etalonů,
- problém dostatečného vybuzení můstku (z důvodu měření velice nízkých impedancí),
- problém s vyvážením proudů tekoucím koaxiálními kabely (proud žilou se musí rovnat proudu procházející stíněním),
- stanovení korekcí můstků,
- kalibraci navrženého můstku pomocí vyvinutých vypočitatelných etalonů včetně jejich charakterizace v celém kmitočtovém pásmu až do 1 MHz (ověřeno bylo i chování těchto etalonů v daném kmitočtovém pásmu),
- realizaci ovládacího softwarového vybavení.

Řešení těchto dílčích problémů jsou v práci velice dobře a detailně popsány. Doktorand postupně provedl návrh a zrealizoval jednotlivé komponenty můstku. Těmi jsou

- pasivní koaxiální tlumivky pro oblastní nízkých kmitočtů pro dosažení vyvážených proudů v koaxiálních kabelech,
- 3 kanálový DDS generátor harmonického průběhu s fázově spřaženými výstupy,
- audio zesilovač a hlavní napájecí transformátor můstku pracující do 100 kHz,
- VF zesilovač pro pásmo 10 kHz až 1 MHz,
- multiplexorem pro přepínání měřících míst v můstku (HP svorky obou etalonů, LP svorky obou etalonů),
- software pro PC umožňující automatické vyvažování můstku včetně implementace různých korekcí (korekce zatížení HP svorky etalonů, korekce přeslechu multiplexoru, korekce linearity můstku, korekce chyby Kelvinova obvodu).

Při návrhu a realizaci těchto hlavních komponent můstku doktorand vycházel z již dobře známých principů (např. návrh injekčního transformátoru, koaxiálních tlumivek), při vlastní realizaci se snažil o dosažení co nejlepších parametrů. Důkazem může být např. návrh použitého multiplexoru a jeho zapojení do můstku (viz obr. 3.46). Multiplexor skutečně vykazuje unikátní vlastnosti, což má významný vliv na dosažené nejistoty měření. Díky technice aktivního stínění na vstupní a výstupní straně bylo možné dosáhnout skutečně velice vysoké vstupní impedance (vstupní kapacita < 1 pF),

V neposlední řadě je třeba vyzdvihnout celkovou analýzu nejistot měření s tímto digitálním vzorkujícím můstkem. Ta je zpracována velice detailně a dle mého soudu doktorand neopomněl žádný faktor mající vliv na nejistoty měření.

Součástí práce je též experimentální ověření měřící schopnosti můstků (kap. 3.8.). Na naměřených hodnotách je ukázána velice dobrá shoda, pokud se porovnají výsledky měření získané tímto digitálním můstkem s výsledky opírající se o znalosti AC/DC difference pro použité bočníky.

Ad d) Význam pro praxi nebo rozvoj oboru

Význam pro praxi nebo rozvoj oboru je vynikající.

Komentář: Dosažené výsledky již našly přímé uplatnění v praxi, neboť dle všech dostupných informací můstek jako takový byl vyvíjen na pracovišti ČMI – OI Brno, potažmo byl použit pro mezinárodní porovnání AC/DC difference koaxiálního proudového bočnicku 100 mA. Díky nasazení digitálního můstku v ČMI v roce 2020 požádalo o nové vylepšené hodnoty CMC, protože došlo k výraznému rozšíření z pohledu nejen frekvenčního pásma (nově až 1 MHz), ale též i z pohledu měřícího rozsahu modulu impedance i fáze.

Ad e) Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň je vynikající.

Komentář: Dizertační práce je napsaná v českém jazyce, což ve velíká škoda. Větší dopad a ohlas by mohla přinést, pokud by byla sepsána v jazyce anglickém. Po formální stránce je práce zpracována na vysoké úrovni, nenašel jsem v práci nic, co by zasloužilo kritiku. Text je velice dobře srozumitelný s minimem překlepů a členěn do čtyř kapitol, rozsah práce je celkem 138 stran bez příloh. Práce je doplněna velkým množstvím vlastních, mnohdy i barevných obrázků či grafů obsahující naměřené hodnoty, což významně pomáhá se orientovat v dané problematice.

Ad f) Disertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona

Disertační práce podmínky uvedené v § 47 odst. 4*) zákona č. 111/1998 sb. o vysokých školách splňuje.

*(*4) Studium se řádně ukončuje státní doktorskou zkouškou a obhajobou disertační práce, kterými se prokazuje schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu nebo vývoje nebo k samostatné teoretické a tvůrčí umělecké činnosti. Disertační práce musí obsahovat původní a uveřejněné výsledky nebo výsledky přijaté k uveřejnění.*

Ad g) Prokázání tvůrčí schopnosti studenta v dané oblasti výzkumu a zda práce splňuje nebo nesplňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru.

Doktorand prokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a práce splňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru.

Komentář: Z předložené práce vyplývá, že doktorand zcela jasně prokázal schopnost samostatné a tvůrčí vědecké práce. Veškeré problémy byly řešeny nikoliv jen povrchně, ale skutečně jsou řešeny do hloubky. Z práce je též patrné, že doktorand je též schopen využít stávající poznatky k získání nových poznatků či zajímavých nových řešení. Výsledkem této práce je digitální vzorkující můstek, jehož měřicí schopnost v oblasti měření malých impedancí je plně srovnatelná s měřicími metodami používanými předními metrologickými instituty. Díky silné vazbě na ČMI v Brně je zde předpoklad, že v této oblasti bude setrvávat i nadále. Doktorand má veškeré předpoklady k tomu, aby se tak stal platným vědeckým pracovníkem ČMI v oblasti navazování malých impedancí. Práce bez výhrady splňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru.

Celkové hodnocení: Celkově hodnotím dizertační práci jako velice zdařilou i zajímavou. Obsahuje celou řadu původních myšlenek, které byly publikovány v impaktovaných časopisech. Autorův podíl na těchto publikacích je nesporný. Výsledky práce již našly praktické uplatnění.

Otázky oponenta:

- 1) V kapitole 3.2.2. je zmínka o použitém toroidním magnetickém jádře pro výrobu koaxiálních tlumivek. Použité jádro z materiálu NANOPERM firmy MAGNETEC dosahuje počáteční permeability až 90 000. Byl při výběru tohoto jádra posuzován i jiný výrobce, např. firma Vaccum Schmelze? Tato firma nabízí materiál VITROPERM 800/500, který vykazuje permeabilitu až 600 000. Jak byla testována účinnost koaxiálních tlumivek v pásmu do 10 kHz?
- 2) Další dotaz souvisí s obr. 3.40. na straně 69. Na tomto obrázku je znázorněn princip provedení výkonového injekčního Kelvinova transformátoru. Dle mého soudu je zapojení chybné či nekorektní. Prosím o znovu vysvětlení toho principu.
- 3) V návrhu 3-kanálového DDS generátoru byl použit D/A převodník LTC1668, který má nominálně 16-bitů. V práci je zmíněno, že byl použit princip ditheringu pro získání 18 bitového rozlišení. Můžete prosím objasnit, jakým způsobem byl dithering implementován?
- 4) Další dotaz souvisí s grafem na obr. 3.53. na straně 78. Jak lze fyzikálně vysvětlit zápornou vodivost vstupního bufferu multiplexoru?

Disertační práci k obhajobě

☒doporučuji

☐nedoporučuji.

Dne: 20.05.2021

Podpis:Radek Sedláček