

Oponentní posudek disertační práce

Uchazeč: Ing. Jan Dušek

Název disertační práce: Optimalizace rekonstrukce obrazu v elektrické impedanční tomografii

Oponent: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Pracoviště opoenta: Ústav radioelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vysoké učení technické v Brně, Technická 3082/12, 616 00 Brno

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 aktuální.

Komentář: Disertační práce se zabývá vybranými částmi široké problematiky elektrické impedanční tomografie (EIT), která nachází své uplatnění v řadě vědních oborů, s významnými praktickými aplikacemi např. v geofyzikálním výzkumu, nedestruktivní diagnostice, v medicíně či biomedicíně. Ačkoli jsou principy EIT poměrně dlouho známy, záležitosti spojené se spolehlivostí, přesností i rychlostí prováděné rekonstrukce obrazu na základě naměřených dat jsou stále důležitými aspekty výzkumu v dané oblasti. Doktorand zaměřil své úsilí právě na výše uvedené oblasti, včetně výzkumu strategií měření a minimalizace doprovodných chyb. Téma disertační práce dle mého názoru plně zapadá do vědního oboru *Teoretická elektrotechnika*.

Ad b) Splnění stanoveného cíle disertační práce

Cíl disertační práce byl splněn.

Komentář: Doktorand si kladl za cíl přispět do oboru EIT především v následujících čtyřech oblastech uvedených v kap. 2 (Aims and objectives):

- 1) v oblasti redukce nejistoty rekonstruovaného rozdělení vodivosti pomocí optimalizace matematického modelu,
- 2) v oblasti urychlení procesu sběru dat v laboratorních i vnějších podmínkách,
- 3) v oblasti optimalizace parametrů modelů uzavřených a otevřených domén,
- 4) v oblasti snížení doby rekonstrukce obrazu pomocí paralelizace algoritmů.

Výše uvedené cíle byly stanoveny na základě pečlivého rozboru současného stavu a kritického zhodnocení metod pro řešení dopředné i inverzní úlohy v EIT, včetně nejčastěji uvažovaných konfigurací proudového buzení a sběru dat u měřicích systémů EIT i dostupných softwarových řešení (kap. 1, Electrical impedance tomography). Posouzením části dizertace, ve které doktorand jednotlivá témata řeší (kap 3, Experiments), mohu konstatovat, že ve všech stanovených oblastech bylo dosaženo hodnotných výsledků, které tak cíle disertace naplňují.

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

Postup řešení problému a výsledky disertační práce jsou průměrné.

Komentář: První kapitola disertace je částí, která se zabývá rozbohem současného stavu poznání v oblasti elektrické impedanční tomografie (EIT), s odkazy na relevantní literární zdroje. Tato část má rozsah 36 stran a působí poněkud učebnicovým dojmem, s mnoha převzatými výsledky rekonstrukcí, diagramy, schémata a tabulkami, bez odkazu na některou vlastní publikaci. Vlastní řešení disertace, s odkazy na publikované práce autora, dominantně na práci v impaktovaném časopise Sensors [81], je náplní kap. 3 a má rozsah 45 stran. Doktorand postupně řeší jednotlivá témata cílů dizertace.

V rámci dílčího cíle ad 1) se práce věnuje optimalizaci parametrů matematického modelu pomocí Nelder-Mead simplexové metody, která je součástí použitého toolboxu EIDORS v programu Matlab. Optimalizace byla prováděna vzhledem k počáteční vodivosti, deformaci tvaru hranice oblasti a poloze elektrod na hranici oblasti. Za velmi cenné považuji ověřování výsledků optimalizace na základě experimentů, provedených na navrženém a sestaveném laboratorním tomografu. V úvahu jsou brány dva typy buzení, se sousedícími a protilehlými proudovými elektrodami. Provedené experimenty prokázaly výhodnost první z uvedených konfigurací, jak z hlediska menších citlivostí na změny sledovaných parametrů, tak nepřítomnosti zrcadlových oblastí rekonstruované nehomogenity.

V rámci dílčího cíle ad 2) je práce zaměřena na návrh, realizaci a ověření prototypu experimentálního tomografu, sestávajícího ze tří základních jednotek: proudového zdroje, multiplexoru a měřicí jednotky. Jak doktorand uvádí, tento prototyp (Precise Low-Impedance EIT system (PLI EIT)) je stále ve vývoji, bylo však již prokázáno podstatné urychlení procesu sběru dat oproti manuálnímu přístupu, např. pro 16 elektrodový systém až 18 krát. Přestože je tato část spíše inženýrského charakteru, tj. obsahuje návrh zapojení a výběr elektronických součástek pro splnění požadavků na parametry tomografu, jedná se o

nezbytný předpoklad pro provádění optimalizací, eliminaci chyb a urychlování celého procesu rekonstrukce v EIT.

V rámci dílčího cíle ad 3) se doktorand zaměřuje na analýzu chyb rekonstrukce pro uzavřenou i otevřenou oblast ve vztahu k počtu elementů generované diskretizační sítě, její struktury a výpočetního času rekonstrukce. Pro posouzení chyb byly zavedeny tři metriky (Jaccardova vzdálenost, MMSE a SSE), ve všech případech byla inverzní úloha řešena na základě Gauss-Newtonovy metody, se třemi typy použité regularizace (Tichonovova, NOSER a Laplaceova). Z teoretického hlediska jsou používány standardní algoritmy (FEM), které jsou přítomny v toolboxech programu Matlab (EIDORS, generátory sítě). Za přínosné lze považovat analýzu a interpretaci obdržených výsledků, se závěry o vhodnosti jednotlivých regularizačních metod s ohledem na chyby, stabilitu a výpočetní čas. Tato část se opírá především o konferenční příspěvek [92], z diskuze však není zřejmé, zda lze učiněné závěry (např. o přednostech Tichonovovy, příp. NOSER, regularizace) zobecnit i pro jiné případy v EIT.

V rámci dílčího cíle ad 4) je řešena problematika urychlení výpočtů na základě jejich paralelizace, pomocí platformy pro paralelní výpočty (CUDA) a grafické procesorové jednotky (GPU), vše realizováno v prostředí Matlab. Základní myšlenka je převzata z citované literatury, doktorand tento přístup dále rozpracovává a zaměřuje se na časově nejnáročnější výpočet Jakobiánu pro aplikaci Gauss-Newtonovy metody v řešení inverzního problému. V další části je doktorandem rozvinuta metodika urychlení celého procesu rekonstrukce v EIT rozdělením jednotlivých výpočetních fází pro zpracování v centrální (CPU) a grafické (GPU) procesorové jednotce. Výpočetní experimenty ukázaly celkové urychlení zpracování rekonstrukce, cca 2x, v příp. rychlosti výpočtu Jakobiánu se však výsledky v tab. 3.11 a 3.12 rozcházejí o celý řád (cca 20x vs. 200x).

Mám-li zhodnotit konkrétní přínos doktoranda, spatřuji jej především v experimentální části práce a navazujícím vyhodnocování a interpretaci výsledků, což vedlo k výše uvedeným závěrům o citlivostech vytvářených modelů a vhodnosti testovaných metod rekonstrukce. V této souvislosti bylo vynaloženo nemalé úsilí v oblasti návrhu a konstrukce experimentálního tomografu, který byl vhodně přizpůsoben pro takovéto testování. Na druhou stranu v teoretické oblasti doktorand využívá již dobře popsané metody, pro které lze nalézt potřebné kódy např. v toolboxech programu Matlab. Řešení inverzního problému EIT bylo omezeno na vybrané deterministické metody, stochastické přístupy jsou zmíněny pouze v úvodní části práce.

Ad d) Význam pro praxi nebo rozvoj oboru

Význam pro praxi nebo rozvoj oboru je průměrný.

Komentář: Výsledky disertační práce jsou využitelné pro vytváření přesnějších modelů v elektrické impedanční tomografii a tedy i přesnějšímu a hodnověrnějšímu mapování rozložení vodivosti ve vnitřních oblastech diagnostikovaných objektů. Získané výsledky mohou sloužit jako podklad pro další výzkum v oblasti EIT a obohacují vědní obor *Teoretická elektrotechnika*.

Ad e) Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň je nadprůměrné.

Komentář: Disertační práce je psána v anglickém jazyce a má celkový rozsah 123 stran, včetně veškerých úvodních a závěrečných částí. Kromě úvodu, diskuze výsledků, závěru a přílohy je práce z obsahového hlediska členěna do 3 hlavních kapitol. Poněkud nestandardně působí příloha A. Preliminary results, neboť v rámci disertační práce by měl být položen důraz na výsledky konečné a ověřené, byť chápu, že výzkum bude dále pokračovat a že se jedná o experimentální ověření navržených postupů.

Některé formální a terminologické nedostatky:

- intensity of the magnetic field strength H ,
- rovnice (1.28) by měla být formulována s maticí A na levé straně, její řešení je dáno až rovnicí (1.29),
- vektor $U_{FEM}(\sigma)$ v rovnici (1.31) a dále není zaveden v části 1.2 dopředného problému, z něhož má plynout,
- obr. 1.50 není odkazován v textu,
- vztah (3.5) pro proud zátěží je za uvedené podmínky (3.4) neúplný,
- u Howlandova obvodu bych ocenil počítačovou simulaci pro zvolené integrované obvody v předpokládaném kmitočtovém rozsahu, tj. 10 Hz - 400 kHz, např. v PSpice,
- prezentovaná simulace multiplexoru nepokryla celý předpokládaný kmitočtový rozsah tomografu,
- v experimentu na str. 78 se uvádí frekvence budicího proudu 1,007 Hz, což je mimo předpokládaný rozsah tomografu,
- na obr. 3.27 by dle mého názoru měly být přehozené osy (výpočetní čas je funkcí počtu elementů),
- nesoulad hodnot pro výpočetní časy Jakobiánu v tab. 3.11 a 3.12.

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: Doktorand uvádí 22 prací za posledních 5 let, které spadají do vědního oboru disertace, u 12 z nich je uveden jako hlavní autor. Ve světově uznávaných databázích lze dohledat 9 prací (Web of Science, h index 2), resp. 10 prací (SCOPUS, h index 3). Klíčovou prací, ve které bylo publikováno jádro disertace, je článek v impaktovaném časopise *Sensors* (2021), IF 3,735 (průměr za 5 let), kvartil Q1 a Q2 (dle uvažovaného oboru), u které je doktorand hlavním autorem. Doktorand při řešení disertace prokázal i schopnost týmové práce, výzkum spojený s tématem disertace probíhal jak v rámci mezifakultní spolupráce (FSI VUT), tak na mezinárodní úrovni (Netrix Reseach and Development Center, Lublin, Poland). Přestože mohl být v oblasti publikací kladem větší důraz na více kvalitních časopisů, domnívám se, že doktorand prokázal své tvůrčí schopnosti a práce splňuje obvyklé požadavky na disertační práce v oboru *Teoretická elektrotechnika*.

Celkové hodnocení:

Doktorand dosáhl především v experimentální části své disertační práce hodnotných výsledků, které vedou k důležitým závěrům o citlivostech modelů a vhodnosti sledovaných metod rekonstrukce. Jádro disertační práce bylo publikováno v impaktovaném časopise kvartilu Q1, některých dalších časopisech, ale také na mezinárodních konferencích v tuzemsku i zahraničí. Přes některé mé kritické pohledy soudím, že disertant je dostatečně vědecky erudovanou osobností, s perspektivou dalšího odborného růstu v dané vědecké oblasti. Jako závěr konstatuji, že **předložená disertační práce přispívá k rozvoji vědního oboru Teoretická elektrotechnika a dokládá schopnosti disertanta k samostatné vědecké práci. Doporučuji**, aby byl panu Ing. Janu Duškovi po úspěšné obhajobě disertační práce **udělen akademický titul Ph.D.**

Otázky oponenta:

- Pohovořte o metodě výpočtu Moore-Penrose pseudoinverze v kontextu vztahu (1.29), jakým způsobem je v použitém software výpočet realizován?
- Na základě jakých kritérií byla volena velikost budících proudů a jejich kmitočet? byly zkoumány i metody založené na multifrekvenčním buzení?
- Při zjišťování vlivu jednotlivých parametrů modelu byly tyto uvažovány vždy odděleně; byly činy nebo jsou plánovány experimenty se zahrnutím současného vlivu více parametrů?

Disertační práci k obhajobě doporučuji nedoporučuji.

Dne: 10.01.2022

Podpis: