



## Přepínací karta pro měření v elektrické impedanční tomografii

Martin Balajka, Jan Mikulka, Jan Dušek (všichni VUT v Brně)

Elektrická impedanční tomografie (EIT) je nedestruktivní metoda pro analýzu homogenity elektrické impedance uvnitř analyzovaného objektu měřením napěťových potenciálů na jeho povrchu. Principem je napájení objektu harmonickým proudem a měření napětí na měřicích elektrodách s následným řešením inverzní úlohy rekonstrukce konduktivity. Oproti jiným tomografickým metodám lze její výhody sledovat hlavně v nižších finančních nárocích na realizaci, absenci ionizujícího záření apod. Lze se s ní setkat v biomedicíně, materiálovém inženýrství, geofyzikálním mapování nebo např. v monitorování chemických procesů. V biomedicíně se lze s EIT setkat např. při statické i dynamické rekonstrukci tkání, analýze tumorů, krevních sraženin, dýchání a mnoho dalších [1-2]. V materiálovém inženýrství nachází EIT uplatnění převážně jako technika nedestruktivní diagnostiky [3]. V chemickém průmyslu se můžeme setkat s EIT při stanovení homogenity emulzí [4]. V geotechnickém inženýrství hraje EIT významnou roli v predikci a sledování stavu vodních hrází či jiných staveb [5]. Všechny aplikace napříč obory mají společný cíl, kterým je velmi přesné měření napěťových potenciálů, přesné generování budicího proudu, přesná a rychlá digitalizace měřených veličin a kvalitní rekonstrukce konduktivity sledovaného objektu. Pro návrh technik aplikovatelných v praxi má tedy námi navržený tomograf umožňující výzkum souvisejících metod v malém laboratorním měřítku obrovský význam.

### SPOLEČENSKÁ RELEVANCE

Přepínací karta pro měření v elektrické impedanční tomografii (EIT) je zcela nové zařízení vyvinuté na Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky v laboratoři elektrické impedanční tomografie, kterou tvoří akademičtí pracovníci i studenti Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysokého učení technického v Brně. Motivací pro vývoj zařízení byl nedostatek komerčně dostupných zařízení pro podporu výzkumu v EIT. V posledních pěti letech vývoje lze dohledat pouze 3 systémy, které lze využít při výzkumu EIT metod, jejichž vlastnosti jsou shrnuty v tab. 1. Srovnáním jednotlivých systémů lze dojít k závěru, že námi navržený systém má neoddiskutovatelnou výhodu ve variabilním a neomezeném počtu elektrod, kmitočtový rozsah spolu s rozlišením měřicích převodníků, viz technický popis. Systém *Open IET* [6] má navíc proprietární elektrodový systém vytvořený na fóliových spojích určený pouze pro měření v dodávané nádobě. Systémy *Portable EIT* a *SWEIT* byly publikovány v [7], resp. v [8], ale nejsou komerčně dostupné.



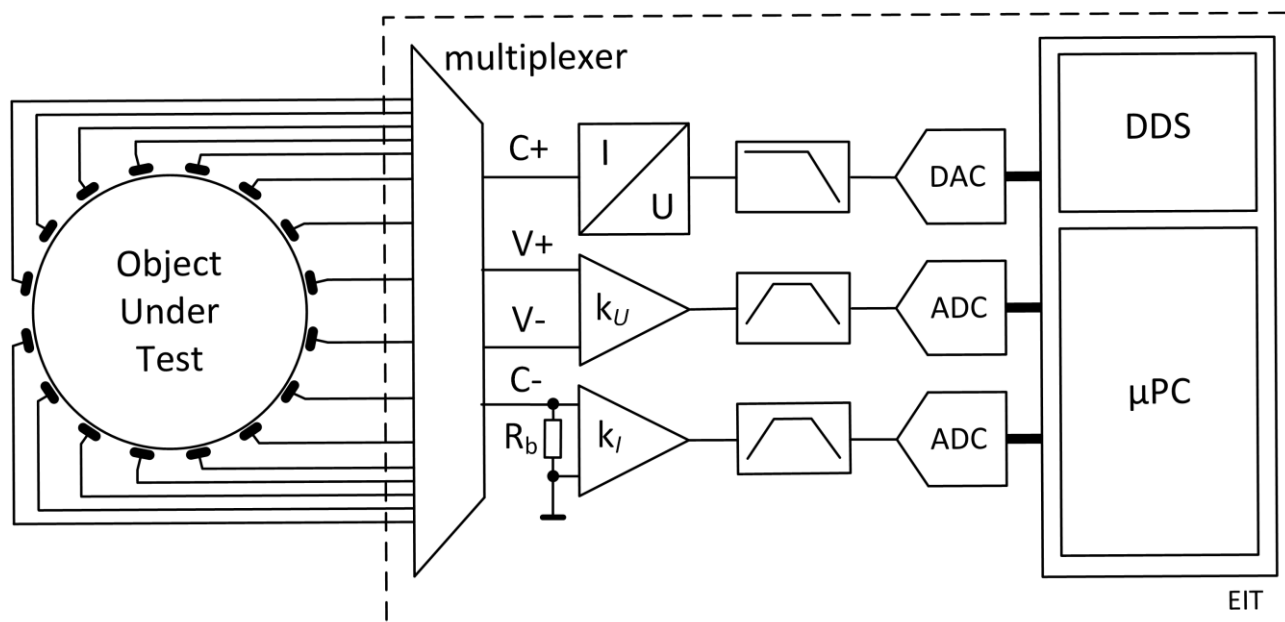
Tab. 1: Aktuálně dostupné systémy pro podporu výzkumu metod EIT.

Název	Počet elektrod	Měřicí proud	Kmitočtový rozsah	Rozlišení měřícího převodníku	Rok uvedení	Odkaz
Open EIT	32	nespecifikovaný	80 Hz – 75 kHz	16 bitů	2018	[6]
Portable EIT	16	0,1 mA	0 – 100 kHz	nespecifikovaný	2018	[7]
SWEIT	16	0,1 mA – 10 mA	1 kHz – 1,1 MHz	nespecifikovaný	2020	[8]

Tento nedostatek komerčně dostupných zařízení tak současně nutí řadu výzkumných skupin k práci se syntetickými daty generovanými ve výpočetních softwarech (Matlab, apod.), viz např. [9], [10]. Výsledky publikovaných prací jsou pak významně zatíženy čistě teoretickými předpoklady, které se mohou odchýlit od skutečné podoby pořízených dat. Cílem vývoje a následné komercializace karty je podpořit světový výzkum v oblasti EIT a zvýšit tak míru poznání v oblasti úzce specializovaných tomografických metod. V současné době se očekává zájem jak ze strany vědecko-výzkumných institucí, tak z komerční sféry a to na základě dlouhodobější spolupráce. Na národní úrovni bude systém nasazen ve výzkumu sledování stavu vodních hrází ve spolupráci s *Fakultou stavební VUT v Brně*. Je předjednaný zájem od firmy *Netrix, S.A.* v Polsku, která se zabývá nedestruktivními analytickými metodami. Dále bylo podepsáno memorandum o spolupráci s *Lublin University of Technology*, se kterou je také předjednaná spolupráce v oblasti metod EIT a využití navrženého produktu pro podporu společného mezinárodního výzkumu. Společenská relevance výsledku koreluje s širokou aplikovatelností elektrické impedanční tomografie napříč vědecké-výzkumnými obory. V současné době navrženou přepínací kartu využíváme jako laboratorní přípravek pro podporu výzkumu optimalizačních metod rekonstrukce konduktivity. Ve spolupráci s Fakultou stavební při VUT v Brně využíváme zařízení při vyhodnocení homogenity zemin v laboratorním měřítku [11] s plánovaným nasazením v dlouhodobém sledování stavu vodních staveb (vodní hráze, apod.).

## TECHNICKÝ POPIS

Přepínací karta pro měření v elektrické impedanční tomografii (obr. 2) představuje kompletní zařízení nutné pro proudové napájení/buzení analyzovaného objektu a měření elektrických potenciálů na jeho povrchu. Z principu EIT umožňuje rekonstruovat elektrickou měrnou vodivost uvnitř sledovaného objektu pomocí neomezeného množství elektrod díky možnosti kaskádového spojení přepínacích karet. Jak je vidět na obr. 3, navržená karta se skládá ze dvou částí a to a) část napájecí a měřicí (na obrázku vlevo) a b) část přepínací (na obrázku vpravo). Blokové schéma je ukázáno na obr. 1. Část napájecí se skládá z DDS (*Direct Digital Synthesizer*) generátoru signálu, přičemž dává uživateli možnost budít analyzovaný objekt buď harmonickým proudem při analýze měrné vodivosti při jednom konkrétním kmitočtu, anebo také dalšími tvary signálu pro realizaci jednorázových experimentů v širším spektru kmitočtů. Dále tato část karty obsahuje 2 16 bitové A/D převodníky pro digitalizaci napětí měřených na měřicích elektrodách a na bočníku pro zpětnovazební kontrolu budícího proudu. Poslední část této desky tvoří 32 bitový mikroprocesor STM, který řídí komunikaci s nadřazeným systémem a ovládá kaskádovitě pospojované desky přepínačů. Nadřazeným systémem může být buď jednodeskový počítač (např. Raspberry Pi) nebo osobní počítač s implementovaným algoritmem rekonstrukce elektrické konduktivity z měřených dat pořízených přepínací kartou. Výstupem je vždy dvoudimenzionální nebo třídimenzionální obraz rekonstruované mapy konduktivity uvnitř analyzovaného objektu.

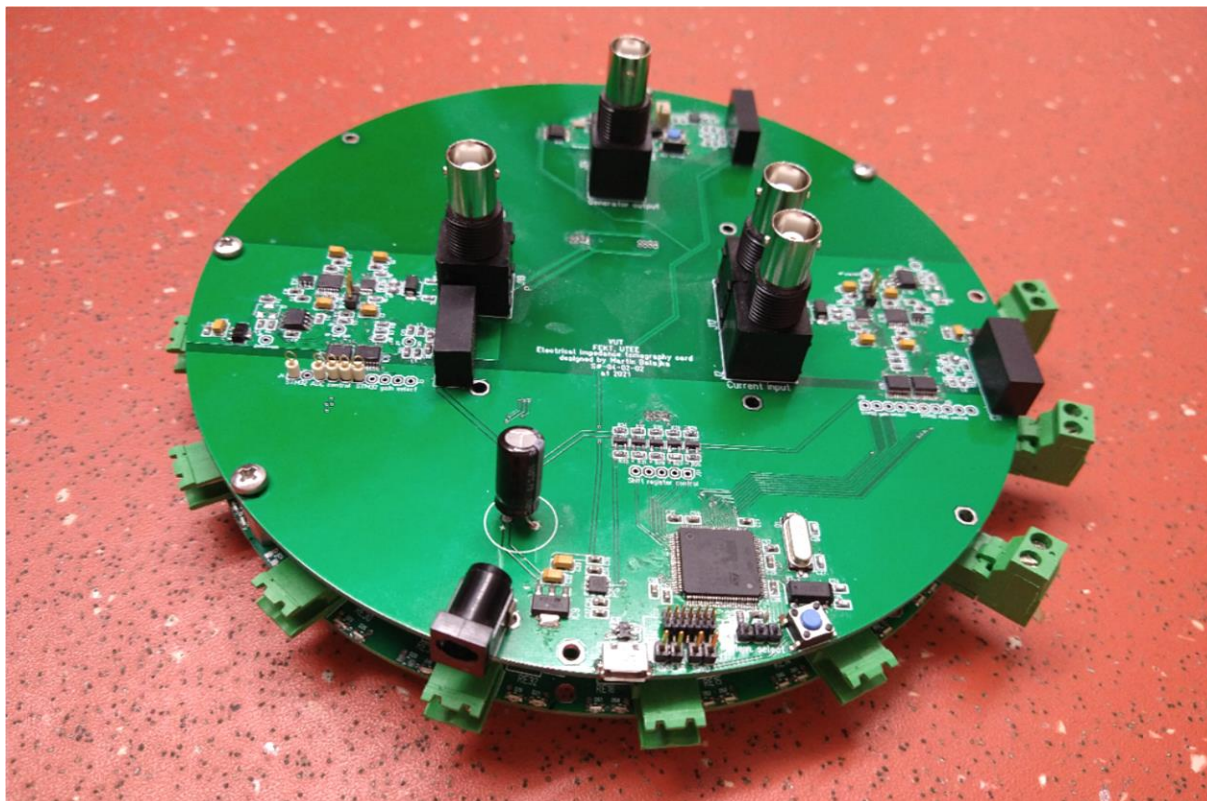


**Obr. 1:** Blokové schéma navržené přepínací karty pro EIT.

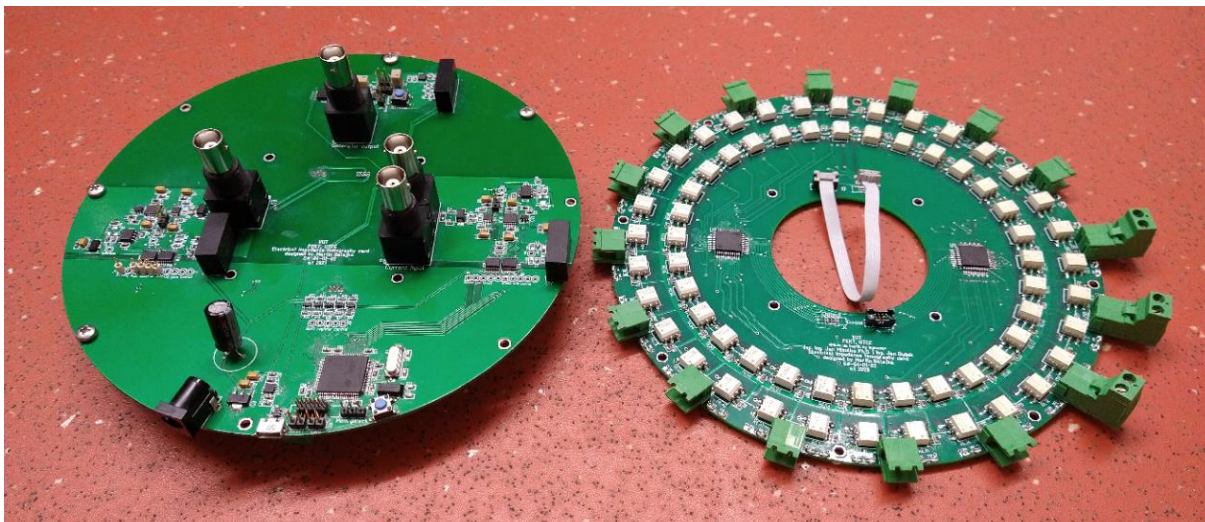
Přepínací desky mohou obsloužit až 16 elektrod tomografu, přičemž jednoduchým propojením plochým kabelem lze připojit prakticky neomezené množství dalších přepínacích karet vždy po 16 elektrodách. To



umožňuje tvořit velmi komplexní měřicí systém pro zvýšení přesnosti rekonstrukce vnitřní měrné vodivosti, pro realizaci trojrozměrné rekonstrukce, příp. pro měření na povrchu netriviálního tvaru. Jako konkrétní příklad využití EIT lze uvést diagnostiku znečištění vodního toku, viz [12].



**Obr. 2:** Pohled na přepínací tomografickou kartu; horní deska pro připojení PC a měřicích přístrojů, spodní deska pro připojení měřicích elektrod.



**Obr. 3:** Pohled na rozloženou přepínací tomografickou kartu; vlevo deska pro připojení PC a měřících přístrojů, vpravo deska pro připojení 16 měřících elektrod.

Navržená měřicí karta byla realizována s několika cíli: finanční nenáročnost, eliminace elektromechanických součástí (relé), nízký odpor měřicí smyčky v sepnutém stavu, komplexnost návrhu bez nutnosti zařazovat další laboratorní přístroje. Všechny tyto vytyčené cíle se podařilo splnit, čímž se naše řešení odlišuje od ostatních komerčně nabízených EIT měřících sestav. Mezi zajímavé konkurenceschopné parametry navržené karty patří: budící proud max. 3 mA špičkově při kmitočtu 10 Hz – 400 kHz, odpor měřicí smyčky v sepnutém stavu  $< 10 \Omega$ , max. spínané napětí měřících elektrod  $\pm 30$  V, rozsah měřených napětí na měřících elektrodách 1 mV – 10 V, rozlišení fázového posunu  $1^\circ$ . Spínací prvky byly navrženy tak, aby galvanicky oddělovaly měřicí a napájecí smyčky a s ohledem na požadavek malého odpor v sepnutém stavu byly realizovány jako obousměrné optoelektronické spínače. Tato vlastnost také není standardním řešením ostatních komerčních řešení. Vybrané parametry konkurenčních systémů jsou uvedeny v tab. 1. Významným benefitem navrženého řešení oproti konkurenčním systémům je jasná specifikace důležitých parametrů ovlivňující kvalitu rekonstrukce měrné vodivosti (např. impedance měřicí smyčky nebo přesnost měření fázového posunu napětí/proud, mezní napětí proudového zdroje), dále široký kmitočtový rozsah, omezení elektromechanických součástí (náhrada relé optočleny) a další. Oproti komerčně dostupnému systému *Open EIT* [6] také navržený systém neomezuje aplikaci použitým elektrodovým systémem.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BOVERMAN, G., T.-J. KAO, X. WANG, J. M. ASHE, D. M. DAVENPORT, and B. C. AMM. Detection of small bleeds in the brain with electrical impedance tomography. *Physiological Measurement* [online]. 2016, 37(6), 727–750. ISSN 0967-3334. Available at: doi:10.1088/0967-3334/37/6/727
- [2] FRERICHS, I., Z. ZHAO, T. BECHER, P. ZABEL, N. WEILER, and B. VOGT. Regional lung function determined by electrical impedance tomography during bronchodilator reversibility testing in patients with asthma. *Physiological Measurement* [online]. 2016, 37(6), 698–712. ISSN 0967-3334. Available at: doi:10.1088/0967-3334/37/6/698
- [3] HALLAJI, M., A. SEPPÄNEN, and M. POUR-GHAZ. Electrical impedance tomography-based sensing skin for quantitative imaging of damage in concrete. *Smart Materials and Structures* [online]. 2014, 23(8), 085001. ISSN 0964-1726. Available at: doi:10.1088/0964-1726/23/8/085001
- [4] KOURUNEN, J., R. KÄYHKÖ, J. MATULA, J. KÄYHKÖ, M. VAUHKONEN, and L. M. HEIKKINEN. Imaging of mixing of two miscible liquids using electrical impedance tomography and linear impedance sensor. *Flow Measurement and Instrumentation* [online]. 2008, 19(6), 391–396. ISSN 0955-5986. Available at: doi:10.1016/j.flowmeasinst.2008.07.002
- [5] RYMARCZYK, T., and P. ADAMKIEWICZ. Monitoring damage and dampness in flood embankment by electrical impedance tomography. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska* [online]. 2017, 7(1), 59–62. ISSN 2391-6761. Available at: doi:10.5604/01.3001.0010.4584
- [6] RINTOUL, J. Documentation and Tutorials for OpenEIT — OpenEIT 1.0.0 documentation. *OpenEIT* [online]. 2018. Available at: <https://openeit.github.io/docs/html/index.html>
- [7] XU, Z., J. YAO, Z. WANG, Y. LIU, H. WANG, B. CHEN, and H. WU. Development of a Portable Electrical Impedance Tomography System for Biomedical Applications. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2018, 18(19), 8117–8124. ISSN 1558-1748. Available at: doi:10.1109/JSEN.2018.2864539
- [8] TAN, C., S. LIU, J. JIA, and F. DONG. A Wideband Electrical Impedance Tomography System Based on Sensitive Bioimpedance Spectrum Bandwidth. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2020, 69(1), 144–154. ISSN 1557-9662. Available at: doi:10.1109/TIM.2019.2895929
- [9] ADLER, A., and W. R. B. LIONHEART. Minimizing EIT image artefacts from mesh variability in finite element models. *Physiological Measurement* [online]. 2011, 32(7), 823–834. ISSN 0967-3334. Available at: doi:10.1088/0967-3334/32/7/S07

- [10] VILHUNEN, T., J. P. KAIPPIO, P. J. VAUHKONEN, T. SAVOLAINEN, and M. VAUHKONEN. Simultaneous reconstruction of electrode contact impedances and internal electrical properties: I. Theory. *Measurement Science and Technology* [online]. 2002, **13**(12), 1848–1854. ISSN 0957-0233. Available at: doi:10.1088/0957-0233/13/12/307
- [11] DUŠEK, J.; MIKULKA, J.; MÚNSTEROVÁ, Z.; PAŘÍLKOVÁ, J. System for conductivity reconstruction of soil sample based on electrical impedance tomography. In EUREKA 2019 - 7th Colloquium and Working Session. EUREKA. neuv. Brno: Brno University of Technology, VUTUM, 2019. s. 90-92. ISBN: 978-80-214-5729-4. ISSN: 2464-4595.
- [12] PAŘÍLKOVÁ, J.; ZACHOVAL, Z.; JANDORA, J.; POSPÍŠILÍK, Š.; MIKULKA, J.; DUŠEK, J.; JUŘIČKA, D.; GJUNSBURGS, B.; RADZEVIČIUS, A.; SKOMINAS, R. THE EIS OPTIONS AT MONITORING THE SPREAD OF POLLUTION IN THE STREAM. *Journal of Marine Technology and Environment*, 2021, roč. 2021, č. 2, s. 39-48. ISSN: 1844-6116.