

LOEE 4.0 – oddaljeno merjenje vektorskega polja z uporabo 3D kartezičnega stroja

Kristjan Vuk Baliž¹, Janez Zaletelj², Marjan Dolinšek¹, Iztok Humar¹

¹LOEE, ²LUCAMI, FE, UL
E-pošta: kristjan.vuk@fe.uni-lj.si

LOEE 4.0 – Remote measurements of vector field employing an universal 3D cartesian machine

Abstract. *This paper presents a progress towards an establishment of remote laboratory exercises of the Fundamentals of electrical engineering course for 1st grade undergraduate students. The project has been started to overcome the issues of current situation, preventing students from being a part of supervised laboratory exercises at the faculty. The key components which are being developed for the remote measurements of the electric field are the Teslameter, the Cartesian positioning machine and the web portal. The system presented in the paper will enable students to remotely observe and control position of the measurement device, and to observe, save and process the values of magnetic field of the coil. The system will offer complete features of the corresponding hands-on lab exercise.*

1 Uvod

Pričujoče epidemiološke okoliščine nas učijo, kako zelo je pomembna tudi agilnost pedagoških pristopov v ustreznem spremstvu tehnoloških rešitev in orodij. Neposredno delo študentov na laboratorijski opremi, ki pomeni pridobivanje nepogrešljivega paketa veščin v smislu zlivanja praktičnega in teoretskega znanja, je bilo v minulem semestru v veliki meri hendikepirano. Glede na aktualne epidemiološke trende smo se v Laboratoriju za osnove elektrotehnike in elektromagnetiko – LOEE spustili v razvoj univerzalnega sistema za oddaljeno izvajanje laboratorijskih vaj pri poučevanih predmetih.

Glede na valovni značaj elektromagnetnega pojava moramo v elektromagnetiki v splošnem v obravnavo spustiti vse štiri dimenzije prostor-časa. Ta kriterij pade tudi na konstelacije laboratorijskih eksperimentov, kjer imamo v najbolj »neugodnem« primeru opravka z merjenjem časovno-spremenljivega prostorskega vektorskega polja, kakršno je npr. magnetno polje ter pripadajoča vektorja; vektor gostote magnetnega pretoka ter vektor magnetne poljske jakosti.

Stroj, ki bi zadoščal takšni štiri dimenzionalni nalogi, je tri dimenzijski kartezični stroj in pa temperatura nad absolutno ničlo, da steče četrt, časovna dimenzija; pa tudi polprevodniki morajo »oživeti«.

2 Zahteve

2.1 Vektorska 3D meritev

Ker so merjene veličine vektorske, moramo poleg obvladovanja štiridimenzionalnega prostor-časa zagotoviti tudi tridimenzionalno, tj. vektorsko meritev (npr. gostote magnetnega pretoka). V ta namen predstavljamo razviti Teslameter 3D in pripadajočo vektorsko Hallovo sondo, ki jo sestavljajo trije enaki enodimenzijski magnetorezistivni senzorji, nameščeni na FR4 origami, oblikovan v strukturo trirobnika.

2.2 Oddaljeni dostop

Izhodišče in pobuda za tovrstno nadgradnjo laboratorijskih eksperimentov je natanko možnost upravljanja na daljavo z ustrezno povratno informacijo (video strujanje merilne konstelacije in pa pridobivanje aktualnih merilnih rezultatov). Potrebna je torej implementacija telemetrije in telekomande, pri čemer naj slednje omogoča karseda dober približek izkušnji, kakršne je študent deležen pri opravljanju vaje v živo. Ciljna tehnologija za omogočenje oddaljenega dostopa je protokolni sklad TCP/IP ter obstoječe in po meri izdelane rešitve na aplikacijskem sloju. Upravljanje z napravo bo mogoče prek grafičnega uporabniškega vmesnika v smislu spletne aplikacije.

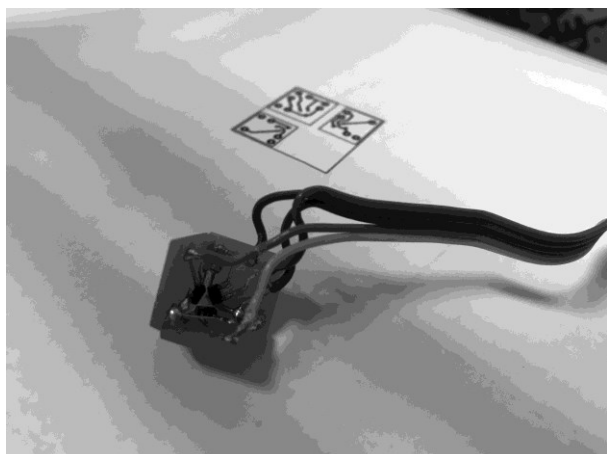
3 Teslameter 3D

V duhu nadaljevanja laboratorijske tradicije, ki je že rodila maloserijski teslameter, je v sklopu tega projekta inicializiran razvoj teslametra za vektorsko merjenje nizkofrekvenčnega magnetnega polja. Prvi izziv je načrtovanje in izgradnja vektorske Hallove sonde.

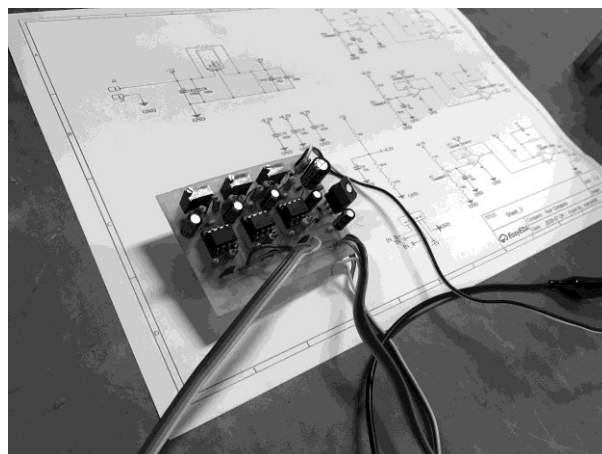
3.1 FR-4 origami

Za izgradnjo vektorske Hallove sonde sta bili na voljo dve možnosti. Uporaba integriranega 3-osnega Hallovega senzorja ali njegova sestava iz treh enoosnih. Z argumenti ekonomičnosti, demonstrativne moči in pa drugih tehničnih karakteristik enih in drugih senzorjev smo se odločili za slednjo možnost. Tri SMD čipe s SOT-23 ohišjem smo postavili v ortogonalno konstelacijo na načrtovani FR4 origami.

Prototip Hallove sonde je nastal v matičnem laboratoriju, kjer smo za potrebe razvoja tega projekta vzpostavili kapacitete za izdelavo prototipnih tiskanic s tehniko prenosa tonerja. Slika 1 prikazuje fotografijo drugega prototipa vektorske Hallove sonde.



Slika 1. Fotografija 2. prototipa vektorske Hallove sonde



Slika 2. Fotografija prototipnega vezja Teslametra 3D

3.2 Elektronsko vezje Teslametra 3D

Uporabljenim čipom je treba zagotoviti stabilno in šuma očiščeno enosmerno napajalno napetost v višini 5 V. Meritev komponente vektorja gostote magnetnega pretoka je dostopna na izhodu čipa kot analogna napetost, superponirana prednapetosti v višini polovice napajalne napetosti – v praksi se izkaže, da ta napetost odstopa do 10 % od pričakovane vrednosti, kot navaja tudi podatkovni list čipa, zato ne gre računati na nek generični postopek nastavljanja inštrumenta.

Ker mora teslometer »otipati« želo zelo šibka magnetna polja, po gostoti primerljiva z zemeljskim, bo za dobro digitalno ločljivost (po analogno-digitalni pretvorbi z amplitudnim območjem 0-5 V) glede na specificirano občutljivost uporabljenega Hallovega senzorja v višini 14 mV/mT, potrebno ustrezno visoko nizkofrekvenčno ojačenje. V ta namen uporabimo operacijski ojačevalnik v invertirajoči vezavi brez razklopnega kondenzatorja na vhodu in izhodu. V povratno vezavo poleg upora dodamo vzporedni kondenzator, ki omeji pasovno širino ojačevalnika in oslabi šum. S tem v resnici delamo kompromis, kajti četudi je zahteva obvladovanje magnetostatičnega polja, nas pri zmanjševanju pasovne širine omejuje najmanjša časovna konstanta RC, ki določa frekvenco zajema meritev pri krajevno spreminjajočem se polju ob premikanju sonde.

Za analogno-digitalno pretvorbo ojačenega signala na izhodu operacijskega ojačevalnika vprežemo ceneni Microchip-ov mikrokrmilnik serije attiny412. Ta ima integriran ADC, ki lahko po časovnem multipleksu vzorči signale na vseh šestih GPIO pinih čipa. Mi bomo za pretvorbo sicer potrebovali tri pine, dva pa bosta služila za serijsko komunikacijo z mikroracionalnikom Raspberry Pi (RPI), preko katere bomo pošiljali digitalizirano 10-bitno meritev.

Slika 2 prikazuje fotografijo izdelanega prototipnega vezja Teslametra 3D.

3.3 Nastavljanje teslametra

Nastavljanje se začne s čim bolj točno nastavitvijo vseh treh referenčnih prednapetosti na neinvertirajočih vhodih operacijskih ojačevalnikov, ki ojačujejo signal s senzorjev. Medtem ko je sonda izpostavljena ničelnemu magnetnemu polju, nastavimo referenčne prednapetosti tako, da se karseda približamo polovični napetosti ciljnega intervala. Tega lahko pogojuje npr. dovoljeno amplitudno območje na vhodu analogno-digitalnega pretvornika, s katerim bomo meritev digitalizirali.

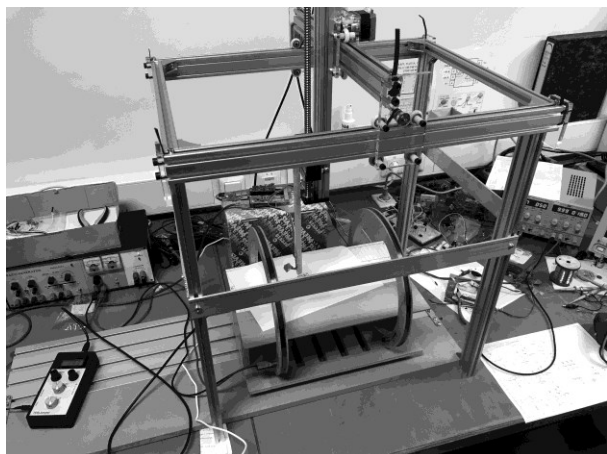
Naslednji korak je odčitek že digitalizirane meritve za posamezen senzor in zapis le-te v pomnilnik kot digitalne vrednosti pri ničelnem polju. Nato posamezen senzor na sondi izpostavimo polju znane gostote, pripadajočo digitalno vrednost pa zopet zapišemo v pomnilnik. Ob, sodeč po podatkovnem listu uporabljenih čipov, upravičeni predpostavki, da je odnos med analognim izhodnim napetostnim signalom in detektirano gostoto magnetnega pretoka linearen, lahko sedaj izračunamo konstanto pretvorbe v obliki tesla na najmanj uteženi bit digitalne pretvorbe [T/LSB].

Kolikšna bosta merilni doseg in ločljivost pri dani bitni globini analogno-digitalne pretvorbe, je stvar načrtovanega/nastavljenega ojačenja operacijskih ojačevalnikov.

4 3D kartezični stroj

Prototipni kartezični stroj je bil izdelan po meri s kriterijem pokrivanja gabaritov od dimenzijsko najmanjših do največjih eksperimentov, s katerimi razpolaga laboratorij. Premike po koordinatnih oseh omogočajo trije koračni motorji, ki jih je za tiho in gladko kinematiko stroja smiselno poganjati v režimu mirkorkorakanja. V ta namen se uporabljajo ustrezna gonilna vezja (za vsak koračni motor po eden), ki so nasajena na RPi ščit proizvajalca PROTONEER PiCNC, namenjen krmiljenju CNC strojev. Ščit z

nadrejenim mikroračunalnikom RPi komunicira s pomočjo asinhronne serijske komunikacije UART.



Slika 3. Fotografija prototipnega kartezičnega stroja

Srce PiCNC ščita je Atmelov 8-bitni mikrokrmilnik. Ta služi kot interpreter G-kode, ki je standardna oblika podajanja ukazov najrazličnejšim računalniško vodenim strojem. Tovrstne ukaze mikrokrmilniku posredujemo s pomočjo UART serijskega vmesnika.

Vsi trije uporabljeni koračni motorji imajo specifikiran kot koraka na $1,8^\circ$. V režimu mikrokorakanja $1/8$ na ta način dosežemo 1600 korakov na en polni obrat motorja, kar nam glede na uporabljena vodila postavi teoretsko mejo resolucije premikov na 25 mikrometrov po oseh x in y ter 2,5 mikrometrov po z osi. Na ta način lahko z zastavljeno robotizacijo laboratorijskih vaj dosežemo veliko večjo krajevno natančnost pozicioniranja sonde, kar tudi izkušnjo nekoliko približa današnjim razmeram v industriji.

5 Oddaljen ogled in upravljanje

Kot sledi iz uvodnih zahtev, želimo upravljanje z napravo omogočiti na daljavo preko interneta z uporabo spletnega vmesnika. Pri zasnovi in izvedbi vmesnika je potrebno upoštevati zahteve glede avtentikacije uporabnikov in spletne varnosti.

5.1 Sistemska arhitektura

Slika 5 prikazuje sistemsko arhitekturo oddaljenega laboratorija.

Nadzor nad kartezičnim strojem, to je premikanje sonde in pa zajem meritev teslametra, zaupamo mikroračunalniku RPi, ki je povezan v lokalno fakultetno omrežje. Na RPi teče Node-RED strežnik, s katerim lahko vizualno v obliki pretokov programiramo priključene naprave in na enostaven način dostopamo do nizkonivojskih in visokonivojskih vmesnikov ter komunikacijskih protokolov. Raspberry tako na eni strani komunicira s ščitom in pa dodatno vpletenim mikrokrmilnikom, na drugi strani pa komunicira s spletnim strežnikom. V obliki MQTT sporočil dobiva ukaze za pozicioniranje ter izvedbo meritev, sam pa

pošilja MQTT sporočila z rezultati meritev ter statusom merilne naprave.

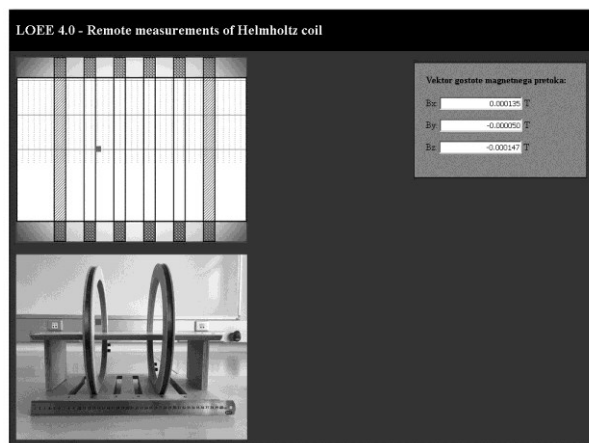
Na RPi je priključena še kamera, ki je lahko bodisi RPi kamera modul, priključena neposredno na namensko vodilo, bodisi običajna spletna kamera. Program »Motion« skrbi za zajem slike ter zagotavlja spletni strežnik, prek katerega dostopamo do slike kamere, ki se samodejno osvežuje. Ker RPi nima javnega IP-ja, se prikaz slike vrši preko proxy strežnika, ki preusmeri HTTP zahtevo na RPi strežnik.

Javni spletni strežnik skrbi za oddaljeni dostop do enega ali več merilnih mest, nadzor dostopa do posameznih mest glede na njihovo razpoložljivost, overjanje uporabnikov s pravicami do dostopa ter prikaz statusa in rezultatov meritev. Večina funkcionalnosti je izvedena v okviru Node-RED pretokov, komunikacija z merilnimi mesti pa poteka po MQTT aplikacijskem protokolu. Node-RED ponuja svoj programirljiv uporabniški vmesnik Dashboard s privzetim naborom modulov za interakcijo s klientom in prikaz podatkov, v katerega pa lahko vgradimo tudi svojo programsko kodo.

5.2 Uporabniški scenarij in spletni vmesnik

Uporabnik si dostop do aplikacije zagotovi z avtentikacijo. Na nivoju prototipa se za ta namen uporablja Google Sign-In API, s pomočjo katerega se avtentikacija najprej izvrši na strani klienta, nakar se pridobljeni žeton (JWT) pošlje aplikacijskemu strežniku, ki preveri identiteto in pooblastila avtenticiranega uporabnika.

Uporabnik je nato preusmerjen na uporabniški vmesnik Node-red Dashboard, kjer lahko spremlja status posameznih naprav oziroma merilnih mest. Ob vsaki uporabnikovi akciji se preverja istovetnost uporabnika preko tehnologije piškotkov.



Slika 4. Posnetek spletnega grafičnega vmesnika za upravljanje z napravo in prikaz meritev

V kolikor je merilno mesto na voljo ter prosto, uporabnik pa je avtoriziran za njegovo uporabo, lahko ta le-tega zaseže za vnaprej določen časovni interval. Na ta način si uporabnik pridobi pravico do nadzora merilne

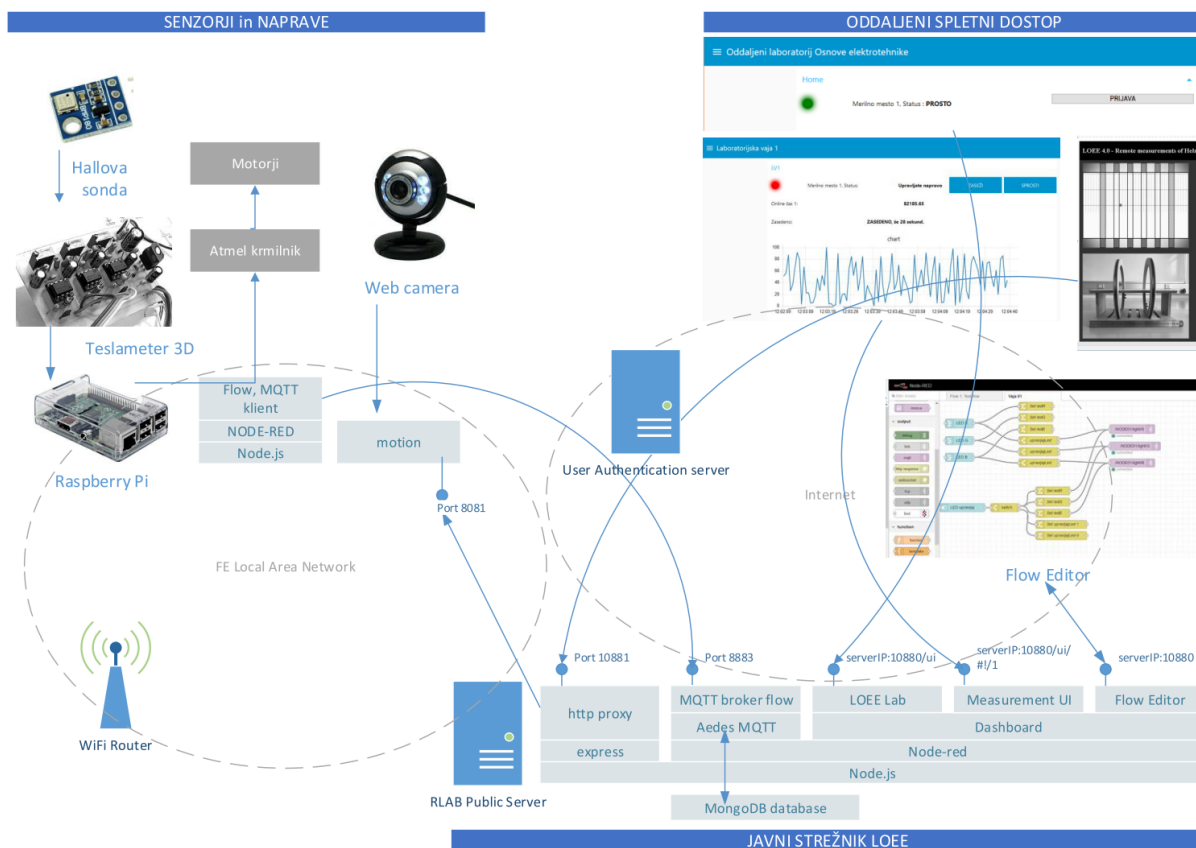
naprave, medtem ko imajo dostop do telemetrijskih podatkov vsi aktivni uporabniki.

5.3 Uporabniški vmesnik za oddaljeno merjenje

Prilagojeni uporabniški vmesnik sestavlja prikaz interaktivne skice merilne konstelacije v dveh projekcijah, na katerih se s povlekom miške pozicionira sondo v 3D območju. Kot povratna informacija je v uporabniški vmesnik vključen tudi živ video kader

kartezičnega stroja z vsebovano merilno konstelacijo, ki daje uporabnik-u/om vpogled v stanje naprave. Na osnovnem vmesniku je prikazan set telemetrijskih podatkov, to je trokomponentna meritev gostote magnetnega pretoka, ki jo zagotavlja razvita vektorska merilna sonda.

Slika 4 prikazuje posnetek osnovnega spletnega grafičnega vmesnika za upravljanje z napravo.



Slika 5. Sistemska arhitektura oddaljenega laboratorija

6 Zaključek

Zastavljeni projekt je izrazito interdisciplinarne narave, njega razvoj pa terja širok nabor elektrotehniških veščin s področij elektromagnetike, elektronike, telekomunikacij, računalništva in nenazadnje programiranja na več nivojih. Zaradi kompleksnosti izvedbe pričakujemo, da bo prva produkcijska različica sistema na voljo šele nekje ob izteku koledarskega leta. Večina predstavljenih prototipnih rešitev je v zgodnji fazi razvoja in nam služijo kot »proof of concept« pri razvoju končnega sistema.

Literatura

- [1] I. Humar, D. Tacar, P. Kokelj: Razvoj, izdelava in uporaba ročnega merilnika gostote magnetnega pretoka - teslametra. Zbornik dvajsete mednarodne Elektrotehniške

in računalniške konference ERK 2011, 19.-21. september 2011, Portorož, Slovenija. Zv. A, str. 79-82.

- [2] P. Kokelj, D. Tacar, I. Humar: Razvoj, izdelava in uporaba merilnika gostote magnetnega pretoka - teslametra. Zbornik devetnajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2010, 20.-22. september 2010, Portorož, Slovenija. Zv. B, str. 369-372.
- [3] P. Kokelj, D. Tacar, Laboratorijske vaje iz OE - magnetno polje. Zbornik osme Elektrotehniške in računalniške konference ERK 1999, 23. - 25. september 1999, Portorož, Slovenija. Zv. B, str. 405-408.
- [4] D. Križaj, M. Polenšek, M. Jankovec: Helmholtzov par kot okolje za spoznavanje osnovnih lastnosti magnetnega polja ob uporabi računalniško podprtega merilnega okolja. Zbornik enainvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2012, 17.-19. september 2012, Portorož, Slovenija. Zv. B, str. 269-272.