

Brezkontaktno merjenje pretoka prevodnih tekočin s pomočjo Lorentzove sile

Mihael Kolar, Tadej Krivec, Gašper Simonič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: mihael.kolar6@gmail.com, tadej.krivec@gmail.com, gasper.simonc@easistent.com

Povzetek. Namen prispevka je predstaviti fizikalno ozadje in princip brezkontaktnega merjenja pretoka prevodnih tekočin s pomočjo elektromagnetne sile, podan je tudi poskus, ki potrjuje navedeno. Pojasnjena je prednost takšnega načina merjenja za merjenje agresivnih ali vročih tekočin. Podani so izpeljava splošnih enačb in različni principi merjenja. Izmerjena sila je premosorazmerna z električno prevodnostjo tekočine, hitrostjo pretoka in z jakostjo magnetnega polja. Šele nedavni razvoj na področju trajnih magnetov in preciznega merjenja sile je omogočil praktično izvedbo takega merilnega instrumenta, čeprav je bilo teoretično ozadje postavljeno že v petdesetih letih prejšnjega stoletja.

Ključne besede: brezkontaktno merjenje, Lorentzova sila, agresivne tekočine, pretok

Non-contact Lorenz force velocimetry for measuring conductive fluids

The paper presents the physical background and the principle of a non contact flow measurement technique of electrically conductive fluids with an electromagnetic force. The explained theory in the paper is supported by an experiment given at the end of the paper. The pros of this technique are presented for measuring of aggressive or/and hot fluids. Derivations of the general equations are given for different measurement principles. The measured force is proportional to the fluid electrical conductivity, flow speed and magnetic-field strength. Recent technical advances in manufacturing the rare earth and non-rare earth strong permanent magnets as well as precise measurement of small forces have enabled practical measurement systems although the theoretical background was established already in the 1950s.

temperaturno območje uporabe veliko pod točko tališča elektrod.

Merjenje pretoka z Lorenzovo silo je že v 50. letih prejšnjega stoletja odkril profesor A. Shercliff [2]. Praktična aplikacija te metode se je zaradi tehničnega razvoja v proizvodnji močnih permanentnih magnetih, natančnih principov merjenja sile in procesne simulacije razvila šele v zadnjih letih [4]. Merjenje pretoka z Lorenzovo silo je brezkontaktna metoda, ki deluje na principu interakcije električno prevodne tekočine z magnetnim poljem permanentnega magneta. Deluje na principu vrtničnih tokov, ki povzročijo, da zaradi tretjega Newtonovega zakona magnet občuti silo, ki je merljiva in odvisna od hitrosti tekočine. Trenutno se razvija v metalurgiji in na drugih področjih.

1 UVOD

Leta 1832 je Michael Faraday poizkusil izmeriti hitrost reke Temze blizu mostu Waterloo [1]. Njegova ideja je bila, da je pretok reke izpostavljen zemeljskemu magnetnemu polju, pri čemer se inducira napetost v dveh elektrodah, postavljenih pravokotno skozi pretok. Danes njegov izum elektromagnetnega merilnika pretoka prinaša širok uspeh v kemijski in živilski industriji in ni omejen z vročimi in agresivnimi pretoki, vendar pa je neuspešen pri največjem izzivu merjenja pretoka [2, 3]. To so taline, ki dosežejo visoko temperaturo (železo, aluminij, steklo) ali za lokalne meritve, kjer ovire ne omogočajo dostopa do kanala, saj je metoda z elektromagnetnim merilnikom pretoka zasnovana z velikimi magneti. Problem je tudi vstavljanje elektrod v talino. Te nam omejujejo

2 FIZIKALNO OZADJE

Brezkontaktno merjenje pretoka električno prevodnih tekočin s pomočjo Lorentzove sile je izvedeno z merjenjem Lorentzove elektromagnetne sile, ki nastane zaradi toka prevodne tekočine pod vplivom izmeničnega magnetnega polja. Faradayev zakon indukcije namreč pravi, da se v kovini ali prevodni tekočini, ki se premika v magnetnem polju, inducirajo vrtnični tokovi, in sicer na območjih maksimalnega gradienta magnetnega polja. Ti vrtnični tokovi na podlagi Amperovega zakona ustvarijo lastno magnetno polje. Medsebojna akcija med vrtničnimi tokovi in primarnim magnetnim poljem ustvari Lorentzovo elektromagnetno silo, ki nasprotuje gibanju oz. toku tekočine. Tudi tukaj velja tretji Newtonov zakon, ki pravi, da akciji vedno nasprotuje reakcija, zato na vir primarnega magnetnega polja

deluje nasprotno enaka sila, kot je tista, ki nasprotuje gibanju tekočine. Z meritvijo te reakcijske sile lahko izmerimo hitrost tekočine, saj je ta sila proporcionalna hitrosti tekočine.

Ko se torej prevodna tekočina premika skozi magnetno polje, ki je ustvarjeno bodisi s trajnim magnetom bodisi s tokovno vzbujujano tuljavo, v njej nastanejo vrtnični tokovi, ki ustvarijo Lorentzovo silo, ki ima gostoto $\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$, in nasprotuje pretoku tekočine. Gostoto te sile lahko aproksimiramo kot

$$F \sim \sigma v B^2 \quad (1),$$

kjer je σ električna prevodnost tekočine, v njena hitrost in B jakost magnetnega polja [2]. Lorentzova sila je torej proporcionalna električni prevodnosti merjene tekočine, relativni hitrosti tekočine glede na magnet in glede na samo jakost električnega polja.

Primarno magnetno polje $\vec{B}(\vec{r})$ lahko ustvarimo s trajnim magnetom ali s primarnim tokom skozi tuljavo $\vec{J}(\vec{r})$ (glej sliko 1). Gibanje tekočine pod tako vzbujujanim magnetnim poljem inducira vrtnične tokove, ki so prikazani na sliki 2, in jih večkrat poimenujemo sekundarni tokovi ter jih označimo z $\vec{j}(\vec{r})$. Interakcija med temi vrtničnimi tokovi in primarnim magnetnim poljem ustvari Lorentzovo elektromagnetno silo v premikajoči se tekočini, ki je enaka

$$\vec{F}_f = \int_f \vec{j} \times \vec{B} d^3\vec{r} \quad (2)$$

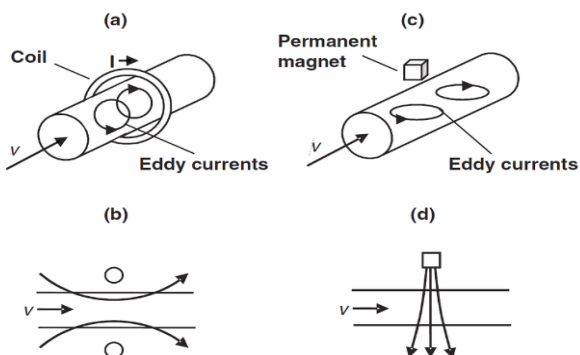
in nasprotuje toku tekočine.

Sekundarni tokovi ustvarijo svoje lastno magnetno polje $\vec{b}(\vec{r})$, sekundarno magnetno polje, ki pa deluje na primarni električni sili in vzbudi Lorentzovo silo \vec{F}_m na trajni magnet ali tuljavo

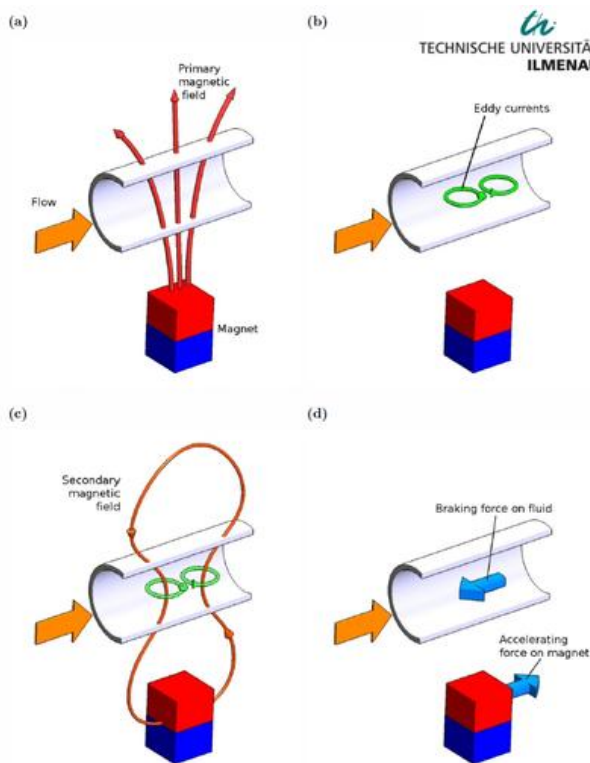
$$\vec{F}_m = \int_m \vec{J} \times \vec{b} d^3\vec{r} \quad (3).$$

V skladu s tretjim Newtonovim zakonom imata ti dve sili, sila na tekočino \vec{F}_f in sila na magnetni sistem \vec{F}_m , enako velikost, vendar nasprotno smer, torej

$$\vec{F}_m = -\vec{F}_f \quad (4).$$

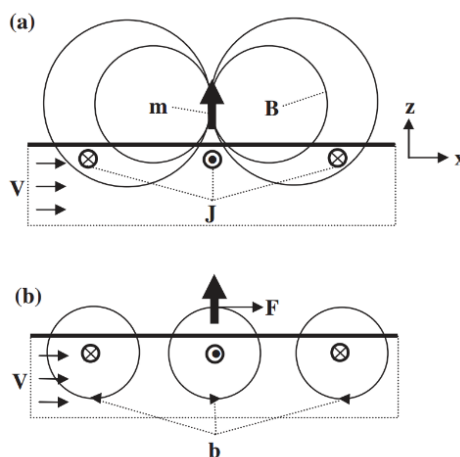


Slika 1: Princip merjenja. a) Postavitev tuljave in b) struktura primarnega magnetnega polja za longitudinalni fluksmeter. c) in d) Isto za transverzalni fluksmeter. Povzeto po [5].



Slika 2: Princip merjenja. a) Prevodno tekočino izpostavimo magnetnemu polju. b) Magnetno polje inducira vrtnične tokove v tekočini. c) Vrtnični tokovi vzbudijo sekundarno magnetno polje. d) Pojavi se zaviralna sila na tekočino, nasprotna na silo na magnet. Povzeto po [6].

Kvantitativno lahko velikost merjene sile pridobimo tudi tako, da si pomagamo z razmerami v našem sistemu (glej sliko 3). Majhen trajni magnet z dipolnim momentom m postavimo na razdaljo L nad neskončno tekočino, ki teče z enakomerno hitrostjo v , ki poteka vzporedno glede na njeno površino.



Slika 3: Ploskovna porazdelitev magnetnega polja. a) Primarno magnetno polje B in vrtnični tokovi J , ustvarjeni z delovanjem magnetnega dipola na enakomerno premikajočo se prevodno tekočino. b) Sekundarno magnetno polje b , vzporedno na vrtnične tokove J . Povzeto po [7].

Pri analizi takega sistema predpostavimo, da je magnet dipol z dipolnim momentom $\vec{m} = m\hat{e}_z$, katerega magnetno polje je podano z

$$\vec{B}(\vec{R}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ 3 \frac{(\vec{m} \cdot \vec{R})\vec{R}}{R^5} - \frac{\vec{m}}{R^3} \right\} \quad (5),$$

kjer je $\vec{R} = \vec{r} - L\hat{e}_z$ in $R = |\vec{R}|$. S predpostavko, da je $\vec{v} = v\hat{e}_x$, za vse $z < 0$, lahko izračunamo vse vrtilne tokove s pomočjo Ohmovega zakona za premikajoče se električno prevodne tekočine

$$\vec{J} = \sigma(-\nabla\phi + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (6)$$

z robnimi pogoji $J_z = 0$, kjer je $z = 0$, in $J_z \rightarrow 0$, ko gre $z \rightarrow 1$ [3]. Najprej pridobimo skalarni električni potencial kot

$$\phi(\vec{r}) = -\frac{\mu_0 v m x}{4\pi R^3} \quad (7),$$

od koder lahko preračunamo gostoto električnega toka. Ko imamo to znano, lahko uporabimo Biot-Savartov zakon za izračun sekundarnega magnetnega polja $\vec{b}(\vec{r})$. Sila je nato podana kot

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \nabla)\vec{b} \quad (8),$$

kjer moramo gradient \vec{b} izračunati na poziciji dipola. Za dani problem lahko tako analitično pridobimo rešitev

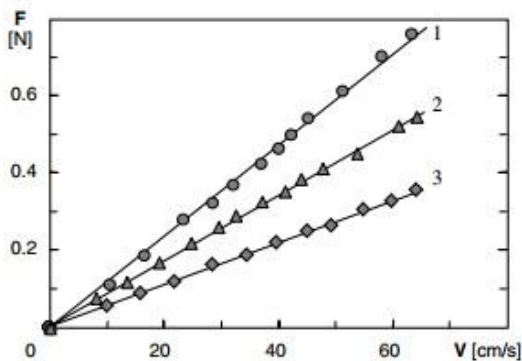
$$F = \frac{\mu_0^2 \sigma v m^2}{128\pi L^3} \hat{e}_z \quad (9),$$

ki nam da približek

$$F \sim \mu_0^2 \sigma v m^2 L^{-3} \quad (10).$$

3 DIREKTNO MERJENJE SILE

Permanentni magnet je postavljen v bližino pretoka, ki ga želimo izmeriti. Lorentzova sila generira vrtilne tokove. Ti po istoimenskem pravilu inducirajo magnetno polje, ki nasprotuje spremembi magnetnega polja, ki ga je ustvarilo.

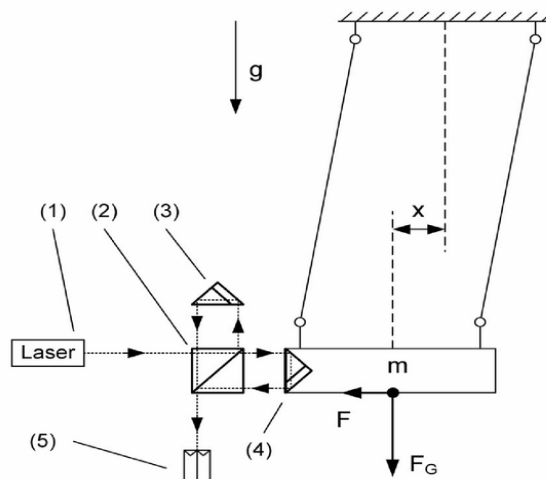


Slika 2: Graf odvisnosti sile, ki jo povzročijo vrtilni tokovi od hitrosti tekočine, prikazan s tremi različno močnejšimi magneti. Povzeto po [5].

Pripadajoča sila magnetnega polja vrtilnih tokov zavira tok tekočine. Po Newtonovem tretjem zakonu mora na permanentni magnet delovati nasprotno enaka sila, ki je šibka, vendar merljiva, in se uporablja za merjenje pretoka elektrolitske snovi.

Merilni sistem je sestavljen iz dveh vzporednih vzmeti, na katerih sta pritrjena permanentna magnetna, katerih magnetno polje je pravokotno na smer pretoka. Silo, ki jo povzroči Lorentzova sila, lahko merimo s pomočjo odklona, tega pa s torzijo vzmeti. Torzija vzmetnega elementa je izmerjena z merilnikom torzije, žico, kateri se s spreminjanjem dolžine spreminja upornost.

Približek sile lahko zapišemo z enačbo (10) $F \sim \mu_0^2 \sigma v m^2 L^{-3}$ [5]. Sila je proporcionalna hitrosti merjene tekočine in tudi prevodnosti, kar vidimo tudi s slike 4. Pri taki meritvi predpostavljamo, da je prevodnost snovi poznana v vsakem trenutku meritve oz. je konstantna, preostali elementi enačbe pa nam določajo občutljivost. To je zelo uporabna ugotovitev, saj vidimo, da je sila odvisna od kvadrata magnetizacije (ali kvadrata električnega toka v primeru elektromagneta) [5]. Občutljivost lahko torej povečamo z močjo magnetnega polja. Iz tega sledi, da bi bila lahko brezkontaktna metoda uporabna tudi za slabo prevodne snovi, kot je npr. steklo, ki je nedosegljivo drugim brezkontaktnim metodam merjenja pretoka.



Slika 3: Princip merjenja sile z interferometrom. (1) Laser, (2) delilnik žarkov, (3) referenčni odbijalec žarkov (4) merilni odbijalec žarkov, (5) foto-detektor. Povzeto po [8].

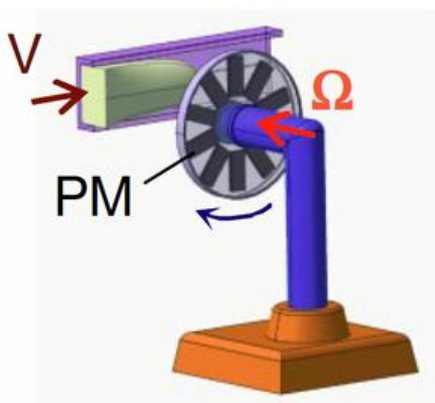
Pri merjenju pretoka slabo prevodnih snovi se odklon meri z interferometrom, kot je prikazano na sliki 5. Magneta drži vzmet iz kvarčnega stekla, ki ima izjemne mehanske lastnosti, kot so npr. nizka elastičnost in nizko temperaturno raztezanje, kar pripelje do linearosti deformacije vzmeti [8, 9].

Z interferometrom lahko deformacijo zaznamo že na 0.1 nm natančno.

4 ROTACIJSKI MERILNIKI PRETOKA

Rotacijski merilnik pretoka, ki deluje na brezkontaktnem principu, je sestavljen iz permanentnih magnetov enakomerno razporejenih po obodu diska, nameščenega na osi v bližini cevi, po kateri se pretaka električno prevodna tekočina. Takšen merilnik imenujemo rotacijski merilnik hitrosti pretoka na osnovi Lorentzove sile (»Lorentz force velocimetry«). Magneti so postavljeni tako, da je njihovo magnetno polje pravokotno na os vrtenja. Magnetno polje permanentnih magnetov povzroči v pretoku vrtnične tokove, ki po Amperovem zakonu ustvarijo lastno magnetno polje. To sekundarno polje z Lorentzovo silo zaviralno vpliva na pretok tekočine. Po tretjem Newtonovem zakonu, recipročnosti sil, deluje sila z isto absolutno vrednostjo in nasprotnim predznakom na magnet. Elektromagnetna sila na magnet na disku je šibkejša na bolj oddaljeni strani in tako povzroči vrtenje.[6] Zdaj lahko merimo kotno hitrost rotorja, ki je premo sorazmerna s hitrostjo pretoka in obratnosorazmerno z razdaljo med magnetom in cevjo. Druga geometrijska oblika rotacijskega merilnika je en sam cilindričen magnet, katerega magnetno polje je vzporedno z osjo vrtenja.[10] V nasprotju s prvo različico se tukaj magnet vrti zaradi navora, ki ga povzročajo magnetne sile. Ko se ta magnet začne vrteti, nastanejo dodatni vrtnični tokovi, ki zavirajo rotacijo. Ravnovesno rotacijo dobimo, ko se zaviralni navor izenači z gonilnim. Prednost takega načina je, da je neodvisen od električne prevodnosti tekoče kovine (torej tudi temperature) in moči magneta.

Rotacijski merilnik lahko uporabimo tudi kot elektromagnetno črpalko, če na rotor apliciramo zunanji vir rotacije.[11]

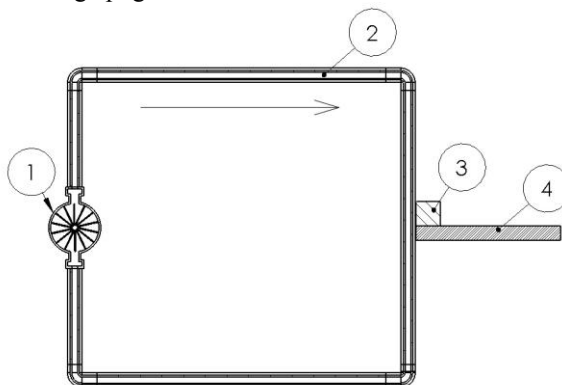


Slika 4: Prikaz rotacijskega merilnika z uporabo več magnetov. Povzeto po [12].

5 POSKUS

Poskus, katerega namen je dokazati obravnavani princip merjenja, je bil narejen z uporabo pretočne zanke, prikazane na sliki 8. Zanka je sestavljena iz polietilenske cevi, skozi katero se pretaka elektrolitska

raztopina natrijevega tetraborata ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) s prevodnostjo $\rho = 20 \text{ mS/m}$ pri sobni temperaturi. Za pretok tekočine skrbi pretočna črpalka s hitrostjo pretoka $v = 1,7 \text{ m/s}$. Presek cevi je $S = 10^{-4} \text{ m}^2$ in je nameščena na minimalni razdalji 1 mm od magneta. Uporabljen je magnet v obliki kocke, stranica je dolga $d = 25 \text{ mm}$. Razred magnetizacije magneta je N38, magnetno polje na površini magneta $B = 1220 \text{ mT}$. Sila na magnet je merjena s pomočjo teže, in sicer s tehtnico Mettler Toledo hx204, ki meri na 0,1 mg natančno oziroma zazna silo $9,8 \cdot 10^{-7} \text{ N}$. Ker je pretok usmerjen vertikalno ima v neposredni bližini magneta sila samo komponento Z in lahko le-to merimo kot spremembo teže na tehtnici. Največja mogoča sila z uporabljenim sistemom bi bila $30 \mu\text{N}$. Ker je tehtnica zelo občutljiva, smo morali najprej izločiti šum okolice tako, da smo naš sistem testirali brez magneta. Pri končnih meritvah smo izmerili povprečno silo $19 \mu\text{N}$. Pri uporabi enačbe (9) to pomeni hitrost pretoka $1,05 \text{ m/s}$. Pri meritvah so bila velika odstopanja, vendar je bilo pri vsakem vklopu črpalke očitno, da se generira sila, ki je veliko večja od merilnega pogreška tehtnice.



Slika 8: Sestava merilnega okolja. (1) Črpalka, (2) cevi, (3) magnet, (4) tehtnica.

6 SKLEP

Opisano brezkontaktno merjenje pretoka prevodnih tekočin obeta velik napredek v metalurgiji, saj imajo takšni merilniki daljšo življenjsko dobo in so natančnejši, hkrati pa cenejši, ker so večinoma izdelani iz standardnih materialov. Z opisanim postopkom, lahko izmerimo tudi hitrost gibanja kovin v trdnem stanju, z njim lahko detektiramo mikrodefekte v materialu, pomaga nam pa tudi pri izdelavi bolj homogenih kovin. V Sloveniji je ta tematika slabo poznana, medtem ko v tujini zbuja čedalje večjo pozornost znanstvene srenje. Prav tako se predvideva, da bo z bolj preciznimi merilniki mogoče merjenje pretoka elektrolitskih tekočin [13].

LITERATURA

- [1] M. Faraday, Phil. Trans. 15, 175 (1832).
- [2] J. A. Shercliff, The Theory of Electromagnetic Flow-Measurement.
- [3] http://tces.dem.ist.utl.pt/lxaser/lxaser2014/finalworks2014/papers/01.2_1_38paper.pdf.
- [4] M. Abele, Structures of Permanent Magnets (Wiley, New York, 1993).
- [5] Thess, A., Votyakov, E. and Kolesnikov, Y. Lorentz Force Velocimetry. Phys. Rev. Lett. 96, 2006.
- [6] <http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-27726/ilm1-2013000119.pdf> (20.06.2015).
- [7] Y. Kolesnikov, C. Karcher, A. Thess, "Lorentz Force Flowmeter for Liquid Aluminum: Laboratory Experiments and Plant Tests".
- [8] Wegfrass, A. et al., A universal noncontact flowmeter for liquids. Applied Physics Letters, 100 (2012).
- [9] C. Diethold and F. Hilbrunner, "Force measurement of low forces in combination with high dead loads by the use of electromagnetic force compensation".
- [10] J. Priede, D. Buchenau, G. Gerbeth, "Single-magnet rotary flowmeter for liquid metals", J. Appl. Phys. (2011).
- [11] I. Buceniaks, J. Freibergs and E. Platacis, "Evaluation of Parameters of Powerful Electromagnetic Induction Pumps on Permanent Magnets for Heavy Liquid Metals", IV International Workshop on Materials for HLM-cooled Reactors and Related Technologies ROMA, ITALY, May 21-23, 2007.
- [12] Thess, A., Votyakov, E. and Kolesnikov, Y. Lorentz Force Velocimetry. Phys. Rev. Lett. 96, 2006.
- [13] <https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/public/lorentz-force/publications/proceedings/2012/Thess-EPM-2012.pdf> (30.7.2015).

Mihael Kolar je študent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, smer avtomatika. Trenutno aktivno deluje v visokotehnološkem podjetju, ki se ukvarja s proizvodnjo in razvojem energetskih zaščit.

Tadej Krivec je študent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, smer avtomatika. Aktivno sodeluje na Inštitutu Jožefa Stefana, v laboratoriju za umetno inteligenco.

Gašper Simonič je študent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, smer avtomatika. Sodeluje z laboratorijem za robotiko na Fakulteti za elektrotehniko. Ob pisanju tega članka sodeluje tudi pri prenovi in informatizaciji poslovanja šolstva.