

Numerični model sferičnega magnetoreološkega aktuatorja

Jakob Vizjak, Anton Hamler

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija
E-pošta: jakob.vizjak1@um.si

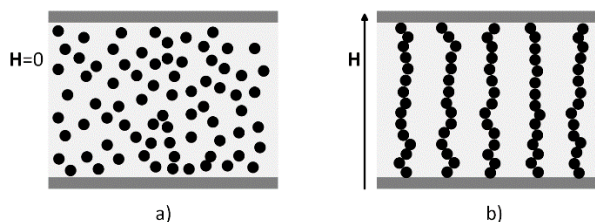
Numerical model of a spherical magnetorheological actuator

Abstract. Magnetorheological fluid is a type of smart fluid. In the presence of a magnetic field, it changes its rheological properties, specifically its viscosity. The fluid consists of a carrier fluid and magnetic particles on the micrometre-scale. Changes in viscosity can be used in various electromechanical applications that require controllable mechanic properties, for example, controllable dampers, brakes, and clutches. This article deals with building a numerical model of a spherical magnetorheological actuator, consisting of a spherical rotor, a stator, a layer of magnetorheological fluid between them, and a coil inside the stator for magnetic field excitation. The goal was to build a model with an interchangeable bottom part and calculate the braking torque and force such an actuator could produce at different current densities in the coil. For comparison, data from two magnetorheological were used.

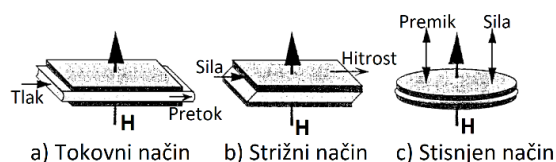
1 Uvod

Magnetoreološka (MR) tekočina je vrsta pametne tekočine, ki pod vplivom magnetnega polja spremeni svoje lastnosti. Gre za spremembo viskoznosti pod vplivom magnetnega polja, kar se imenuje magnetoreološki pojav. Pri magnetnem polju dovolj visoke jakosti, se MR tekočina obnaša kot viskoelastična trdnina. MR tekočina sestoji iz nosilne tekočine (običajno kakšnega olja) in magnetnih delcev velikostnega reda mikrometra. Navadno so dodani še aditivi za zagotavljanje stabilnosti in redispersibilnosti zmesi. Z vidika sestave, je MR tekočina podobna magnetnim tekočinam (ferofluid). Bistvena razlika med njima je v velikosti magnetnih delcev, ki so v magnetni tekočini manjši in sicer nanometerskega velikostnega reda [1], [2]. Sprememba viskoznosti se pripiše formaciji verig magnetnih delcev pod vplivom magnetnega polja, kar ovira prosto gibanje tekočine. Shemo formacije verig prikazuje slika 1. MR tekočino lahko uporabimo na tri osnovne načine. To so tokovni, strižni in stisnjen način. Te shematsko prikazuje slika 2.

MR tekočina se uporablja kot aktivni material v raznih elektromehanskih napravah, kot so blažilniki, zavore in sklopke. Za nas je zanimiva uporaba MR tekočine kot sredstvo za zagotavljanje zavorne sile v sferičnih aktuatorjih. V literaturi [4]–[7] najdemo pristope k razvoju sferičnega MR aktuatorja.



Slika 1. Shematski prikaz formacije verig v MR tekočini pod vplivom magnetnega polja. V primeru a) magnetno polje ni prisotno, v primeru b) pa je usmerjeno, kot kaže puščica.



Slika 2. Shematski prikaz osnovnih načinov uporabe MR tekočine. Tokovni način pod a), strižni način pod b) in stisnjen način pod c) [3].

Podobno, smo mi pristopili k razvoju takšnega aktuatorja z možnostjo modularnega dna, ki omogoča izmenjavo tipa dna, pri čemer centralni sklop aktuatorja (rotor, stator in tuljava) ostanejo enaki.

V sferičnih MR aktuatorjih, se MR tekočina uporablja v strižnem načinu (slika 2a). Obnašanje MR tekočine se opiše z uporabo modela. Običajno je to Binghamov plastičen model, kot v večini primerov iz literature. Med njimi so tudi [4], [6], [8]. Gre za enostaven model, ki pa dovolj dobro opiše delovanje MR tekočine v takšnih aktuatorjih. Model opiše naslednja enačba:

$$\tau = \tau_y + \eta_B \dot{\gamma} \quad (1)$$

Pri tem je τ strižna napetost, τ_y strižna napetost tečenja, η_B plastična viskoznost in $\dot{\gamma}$ strižna hitrost. Ker so v predvidenih aplikacijah premiki krogle (rotorja) počasni, se lahko drugi člen v enačbi (1) zanemari. Tako ostane samo člen strižne napetosti tečenja:

$$\tau = \tau_y \quad (2)$$

Tak aktuator je v osnovi sestavljen iz sferičnega rotorja, statorja, tuljave v statorju za vzbujanje magnetnega polja in MR tekočine v reži med rotorjem in statorjem. Ko je tuljava aktivna, se v MR tekočini vzbudi magnetno polje, kar privede do povečanja viskoznosti MR tekočine in posledično je potrebna višja sila za premik rotorja. Za tak aktuator velja, da je pasiven, saj z aktivacijo ustvari le zavorno silo, ne more pa aktivno

ustvariti pomične sile, torej ne more aktivno premikati rotorja.

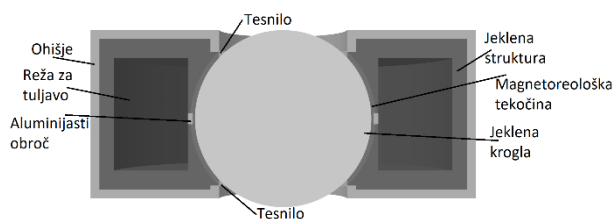
Naš cilj je bil sestaviti 3D model za numerični izračun magnetnih razmer znotraj aktuatorja in posledično izračun zavornega navora, ki ga je tak aktuator zmožen zagotavljati.

Namen končnega aktuatorja je uporaba v haptičnih aplikacijah (vmesnik med uporabnikom in drugim, virtualnim ali oddaljenim, okoljem), kot krmilna palica, ki uporabniku prenaša podatke o zavorni sili iz drugega okolja. V prispevku so predstavljeni začetni koraki k razvoju aktuatorja, ki bo omogočal izmenjavo dna. To dno bo lahko vsebovalo različne dopolnilne elemente, bodisi senzor za določanje položaja rotorja, bodisi dodaten mehanizem za zagotavljanje aktivne povratne sile.

2 Metode in materiali

2.1 Model aktuatorja

V programskem orodju Simulia Opera smo sestavili 3D model osrednjega dela aktuatorja. Presek modela prikazuje slika 3.



Slika 3. Presek sestavljenega modela.

Za zagotovitev majhnosti aktuatorja, smo pri sestavi modela omejili velikost rotorja na 40 mm, maksimalen premer statorskega dela pa na 90 mm. Odprtina na vrhu je bila definirana tako, da omogoča odmik krmilne palice, pritrjene na vrh rotorja, za 30° iz centralne lege (pri premeru palice 5 mm). Položaj aluminijastega obroča smo izbrali tako, da je pri aktivaciji tuljave, gostota magnetnega pretoka čim bolj homogena čez celotno režo z MR tekočino. Ostale dimenzije statorja smo preračunali glede na željeno gostoto magnetnega pretoka v statorju in MR tekočini (okoli 2 T v statorju in pod 1 T v MR tekočini), pri maksimalni predvideni obremenitvi tuljave ($j = 4 \text{ A/mm}$). Dimenzije posameznih komponent podaja tabela 1.

Tabela 1. Dimenzije modela aktuatorja.

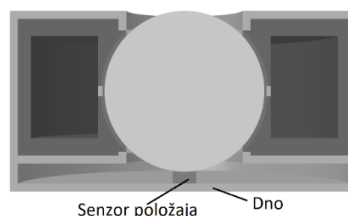
| Del aktuatorja | Dimenzija [mm] |
|---------------------------|----------------|
| Polmer krogle | 20 |
| Odprtina zgoraj in spodaj | 14,5 |
| Debelina reže MR tekočine | 1 |
| Notranji polmer Al obroča | 20,5 |
| Zunanji polmer Al obroča | 21,6 |
| Notranji polmer tuljave | 21,6 |
| Zunanji polmer tuljave | 38,4 |

| | |
|--|-------|
| Zgornji rob tuljave glede na center krogle | 13,7 |
| Spodnji rob tuljave glede na center krogle | -11,7 |
| Polmer aktuatorja | 43,7 |
| Debelina ohišja | 2 |

Za dno aktuatorja je predvideno, da je modularno. Tako ga je možno izmenjati glede na potrebe uporabnika. Primeri dna so lahko: votlo dno, dno s senzorjem položaja rotorja in dno z dodatno aktivno akucijom rotorja. Primer aktuatorja z dnom s senzorjem položaja rotorja prikazuje slika 4.

Ideja tako zgrajenega aktuatorja je, da skozi tuljavo steče enosmeren tok ki v aktuatorju vzbudi magnetno polje. To magnetno polje se zaključuje po magnetnem krogu, ki sestoji iz jekla statorskega dela (jeklena struktura), sferičnega rotorja (jeklena kroglja) in MR tekočine. Vloga aluminijastega obroča je usmerjanje magnetnega fluksa skozi MR tekočino v krogljo in nazaj skozi MR tekočino v stator. S prisotnim magnetnim poljem v MR tekočini, pride do povečanja njene viskoznosti, kar se kaže z oteženo rotacijo krogle.

Na izdelanem modelu smo izvedli magnetostatične izračune z uporabo metode končnih elementov (MKE), kar uporabljeno programsko orodje omogoča. Dobljene rezultate magnetnega polje v MR tekočini na površini rotorja smo izvozili za nadaljnjo obravnavo v programskem orodju Matlab.



Slika 4. Presek modela s primerom dna s senzorjem položaja rotorja.

2.2 Izračun zavornega navora

Navor aktuatorja je vsota navora, ki ga prispeva aktivirana MR tekočina in navora, ki je posledica raznih trenj. Ta so prisotna tudi v primeru, ko magnetno polje ni prisotno. Na drug prispevek med samim delovanjem ne moremo vplivati in zanj želimo, da je čim nižji. Za namene trenutne obravnave, njegov prispevek zanemarimo. Tako upoštevamo samo člen, ki ga prispeva MR tekočina in ga označimo s T_{MRT} .

Navor smo izračunali v programu Matlab glede na dobljene rezultate iz prejšnje točke. Navor opiše naslednja enačba:

$$T_{MRT} = \int_A r \tau dA \quad (3)$$

kjer r predstavlja ročico, τ strižno napetost in A površino. Integral (3) računamo po površini krogle, pri čemer

uporabimo sferične koordinate. Enačba (3) se pretvori v obliko:

$$T_{\text{MRT}} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} f(\theta, \varphi) d\varphi d\theta \quad (4)$$

kjer je θ kot od navpične lege (smer z) navzdol, φ predstavlja kot okoli z osi in f je funkcija odvisna od θ ter φ , ki vključuje ročico, strižno napetost in faktor $r^2 \sin\theta$ zaradi spremembe koordinatnega sistema, kjer je r polmer krogle.

Sferični MR aktuator omogoča gibanje v treh prostostnih stopnjah. Prva je premik v x smeri (rotacija rotorja okoli y osi), druga je premik v y smeri (rotacija rotorja okoli x osi), tretja pa je vrtenje okoli navpične z osi. Matematično sta premika v x in y smeri ekvivalentna. Tako smo obravnavali dva primera: premik rotorja v ravnini x - y in rotacijo okoli z osi.

Za premik v ravnini gre za rotacijo okoli x oziroma y osi. Ročico v tem primeru zapišemo kot $r(\cos^2\theta + \sin^2\theta \sin^2\varphi)^{1/2}$. Funkcija f iz enačbe (4) je tedaj:

$$f(\theta, \varphi) = (r\sqrt{\cos^2\theta + \sin^2\theta \sin^2\varphi})\tau_y(H)r^2 \sin\theta \quad (5)$$

Za vrtenje okoli z osi je ročica $r \sin\theta$. Funkcija f pa je tedaj:

$$f(\theta, \varphi) = (r \sin\theta)\tau_y(H)r^2 \sin\theta \quad (6)$$

Meji θ_1 in θ_2 v integralu (4) sta določeni s položajem zgornjega in spodnjega tesnila. Za naš aktuator sta to $\theta_1 = 46,47^\circ$ in $\theta_2 = 133,53^\circ$.

Pri enačbi (4) gre za dvojni integral. Ker smo pri izvozu podatkov iz izračuna magnetnega polja imeli diskretne vrednosti polja pri določenih vrednostih kota θ in kota φ , smo enačbo računali numerično. Uporabili smo trapezno formulo za aproksimacijo dvojnega integrala. Uporabljena je bila enačba (povzeto po [9]):

$$I = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{(\theta_{i+1}-\theta_i)(\varphi_{j+1}-\varphi_j)}{4} [f_{i,j} + f_{i+1,j} + f_{i,j+1} + f_{i+1,j+1}] \quad (7)$$

Pri čemer je θ_i vrednost kota θ v točki i , φ_j vrednost kota φ v točki j in $f_{i,j}$ je vrednost funkcije $f(\theta_i, \varphi_j)$. N je število točk koordinate θ in M število točk koordinate φ .

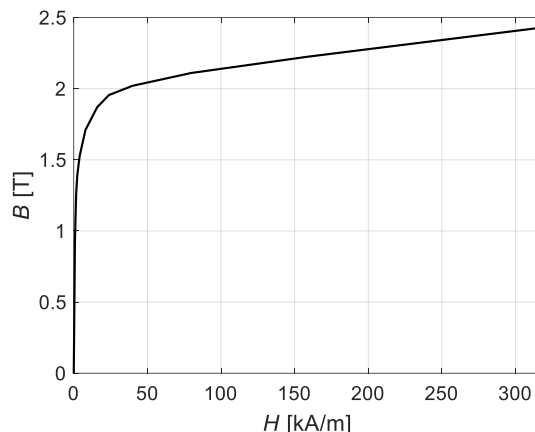
Na koncu smo definirali še dimenzije krmilne palice na vrhu aktuatorja, da smo lahko preračunali navor v zavorno silo, ki jo uporabnik čuti, ko jo premika. Torej, če je F velikost sile in r_p ročica palice glede na točko rotacije, velja:

$$F = \frac{T_{\text{MRT}}}{r_p} \quad (8)$$

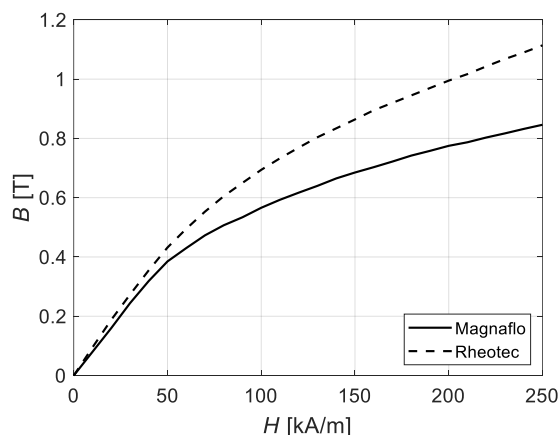
Naj bo krmilna palica nad kroglo cilindrične oblike z dolžino 50 mm in debelino 5 mm, zgornjih 20 mm pa naj ima debelino 10 mm.

2.3 Materiali

Za sestavo aktuatorja je pomembna izbira materialov. Magnetni krog je sestavljen iz statorskega dela aktuatorja, sferičnega rotorja in MR tekočine, ki je med njima. Tako je za material, iz katerega sta sestavljena stator in rotor aktuatorja pomembno, da ima čim višjo permeabilnost in visoko magnetizacijo nasičenja. Ob tem pa je zaželeno, da ima čim nižjo remanenco. Ustrezno za uporabo v aktuatorji je nizkoogljično jeklo AISI 1018. Magnetilno karakteristiko, ki poda odvisnost gostote magnetnega pretoka B od magnetne poljske jakosti H , tega jekla prikazuje slika 5. Za ohišje aktuatorja smo izbrali aluminij. Za podatke MR tekočine smo izbrali podatke komercialno dobavljive MR tekočine. Za primerjavo smo uporabili podatke dveh različnih MR tekočin istega proizvajalca, in sicer tekočini Magnaflo⁺ (Magnaflo) in Rheotec⁺ (Rheotec), proizvajalca Arus MR Tech. Tekočini se razlikujeta v vsebnosti magnetnih delcev, pri čemer je masna koncentracija delcev v tekočini Magnaflo 80%, medtem ko v tekočini Rheotec 84%. Aluminij smo definirali kot linearen material, z relativno permeabilnostjo $\mu_r = 1,000022$. Za tesnilo smo definirali material z relativno permeabilnostjo $\mu_r = 1$. Magnetilni karakteristiki MR tekočin, povzetih iz tehničnih listov, prikazuje slika 6.



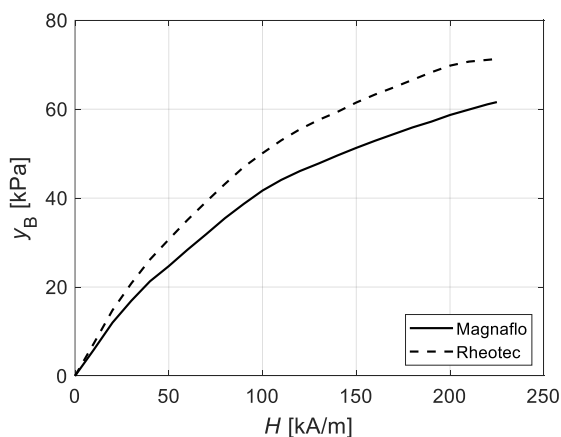
Slika 5. Magnetilna karakteristika jekla AISI 1018 [8].



Slika 6. Magnetilni karakteristiki tekočin Magnaflo in Rheotec.

Pomemben podatek za izračun navora je krivulja strižne napetosti tečenja v odvisnosti od magnetnega

polja, ki je podana v tehničnem listu MR tekočine, ki jo za obe tekočini prikazuje slika 7.

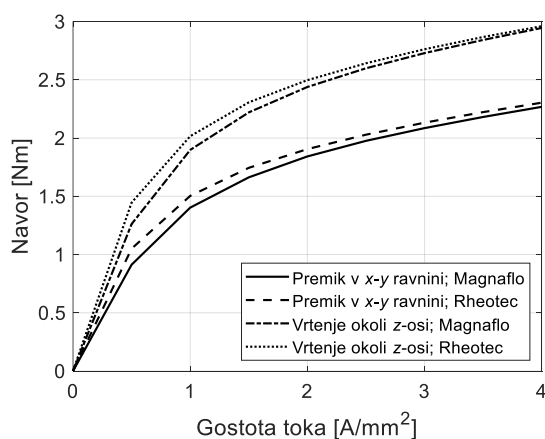


Slika 7. Odvisnost strižne napetosti tečenja od magnetne poljske jakosti za tekočini Magnaflo in Rheotec.

3 Rezultati

Izračune smo izvedli pri različnih tokovnih gostotah j skozi tuljavo aktuatorja. Te so bile med 0 A/mm^2 in 4 A/mm^2 , po koraku $0,5 \text{ A/mm}^2$. Rezultate izračunov za obe tekočini (Magnaflo in Rheotec) prikazuje slika 8.

Razvidno je, da v primeru tekočine Rheotec, aktuator dosega višji navor, kot v primeru tekočine Magnaflo, tako za premik v x - y ravnini, kot za vrtenje okoli z -osi. To je posledica višje strižne napetosti tekočine Rheotec (slika 7), kar je posledica višje vsebnosti magnetnih delcev v sami tekočini. Ima pa tekočina Rheotec tudi višji zavorni navor, ko magnetno polje ni prisotno ($j = 0 \text{ A/mm}^2$), kar je nezaželeno. Primerjavo navora v odsotnosti magnetnega polja podaja tabela 2.



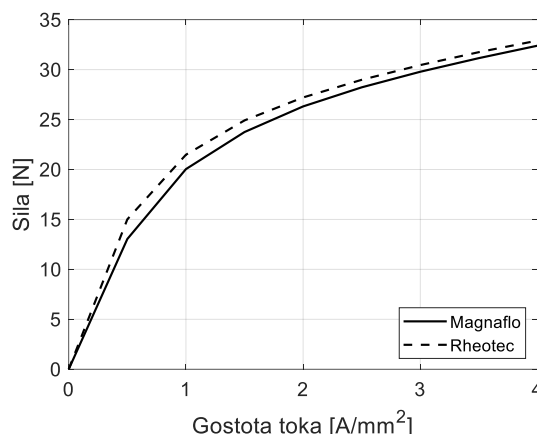
Slika 8. Navor v odvisnosti od gostote toka v modelu aktuatorja za MR tekočini Magnaflo in Rheotec.

Tabela 2. Primerjava zavornega navora tekočin, ko magnetno polje ni prisotno.

| Tekočina | Navor [Nm] |
|------------------------------|-----------------------|
| Magnaflo – ravnina x - y | $2,74 \times 10^{-4}$ |
| Magnaflo – z -os | $3,74 \times 10^{-4}$ |

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Rheotec – ravnina x - y | $1,20 \times 10^{-3}$ |
| Rheotec – z -os | $1,50 \times 10^{-3}$ |

Za premikanje v x - y ravnini je smiselno govoriti o zavorni sili na vrhu krmilne palice, ki pri uporabi deluje na uporabnika. Velikost te sile v odvisnosti od gostote toka prikazuje slika 9. Ko magnetno polje ni prisotno, je sila za primer tekočine Magnaflo $F_1 = 0,0039 \text{ N}$ in za Rheotec $F_2 = 0,0171 \text{ N}$. Razmerje $F_2/F_1 = 4,36$.



Slika 9. Zavorna sila v odvisnosti od gostote toka za premik v ravnini x - y .

4 Zaključek

V prispevku smo sestavili numerični model sferičnega MR aktuatorja. V programu za modeliranje in računanje po MKE smo izračunali magnetne pogoje v MR tekočini znotraj aktuatorja pri različnih tokovnih gostotah skozi model tuljave. Dobljene rezultate smo nadalje uporabili za izračun dosegljivega zavornega navora. Pomembni sta dve vrednosti navora. Ena nastopi pri premikanju rotorja v ravnini x - y , ki je nižja za vse vrednosti tokovne gostote od druge, ki nastopi pri rotaciji rotorja okoli z -osi. Primerjali smo rezultate dveh MR tekočin, pri čemer ima ena višjo vsebnost delcev v nosilni tekočini, kar pomeni tudi višjo magnetilno krivuljo in višjo strižno napetost tečenja. Pri tem smo ugotovili, da aktuator s tekočino z višjo vsebnostjo delcev, dosega višje navore in posledično višje sile, ima pa tudi višji (neželen) navor, ko polje ni prisotno. Navor aktuatorja danih dimenzij dosega maksimalne vrednosti v območju med 2 in 3 Nm, kar je v mejah pričakovanih rezultatov tako velikega aktuatorja. S skaliranjem dimenzij aktuatorja je glede na enačbe (3)–(6), možno dosegati višje (oziroma nižje) vrednosti navora.

Nadaljnje delo predvideva optimizacijo geometrije aktuatorja glede na postavljene dimenzijske omejitve in pa sestava fizičnega aktuatorja ter na njem izvedene meritve, kar bo omogočalo primerjavo z numeričnim modelom.

Literatura

- [1] J. Vizjak, M. Beković, M. Jesenik, in A. Hamler, „Development of a Magnetic Fluid Heating FEM Simulation Model with Coupled Steady State Magnetic and Transient Thermal Calculation“, *Mathematics*, let. 9, št. 20, 2021, doi: 10.3390/math9202561.
- [2] J. Vizjak, M. Beković, in A. Hamler, „Vpliv viskoznosti nosilne tekočine na izgube magnetne tekočine v izmeničnem magnetnem polju“, 2020, str. 181–184. [Na spletu]. Dostopno na: <https://erk.fe.uni-lj.si/2020/ERK20.pdf>
- [3] J. Wang in G. Meng, „Magnetorheological fluid devices: Principles, characteristics and applications in mechanical engineering“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, let. 215, št. 3, str. 165–174, jul. 2001, doi: 10.1243/1464420011545012.
- [4] D. Senkal in H. Gurocak, „Spherical Brake with MR Fluid as Multi Degree of Freedom Actuator for Haptics“, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, let. 20, št. 18, str. 2149–2160, dec. 2009, doi: 10.1177/1045389X09348925.
- [5] M. Ghavghave in P. D. Darade, „Spherical Smart Brake for Multi-Degree of Freedom and Positional Stability“, *Materials Today: Proceedings*, let. 4, str. 7793–7800, jan. 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.114.
- [6] D. Chen, A. Song, L. Tian, Q. Ouyang, in P. Xiong, „Development of a Multidirectional Controlled Small-Scale Spherical MR Actuator for Haptic Applications“, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, let. 24, št. 4, str. 1597–1607, avg. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2916099.
- [7] G. Zhou in H. Gurocak, „Spherical Magnetorheological Brake with Optical Mouse Sensors“, v *2021 9th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, nov. 2021, str. 165–170. doi: 10.1109/ICCMA54375.2021.9646202.
- [8] K. Karakoc, E. J. Park, in A. Suleman, „Design considerations for an automotive magnetorheological brake“, *Mechatronics*, let. 18, št. 8, str. 434–447, okt. 2008, doi: 10.1016/j.mechatronics.2008.02.003.
- [9] M. Dhali, M. Hasan, A. Selim, in N. Barman, „Numerical Double Integration for Unequal Data Spaces“, *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*, let. 06, str. 24–29, dec. 2020, doi: 10.5815/ijmsc.2020.06.04.