

Modeliranje i analiza uticaja magnetnog zasićenja na elektromagnetnu silu u vibracionim aktuatorima

Uroš Lj. Ilić*, Željko V. Despotović*

* Univerzitet u Beogradu, Institut Mihajlo Pupin, Beograd

Rezime - Elektromagnetni vibracioni aktuatori imaju ključnu ulogu kao pogonski elementi industrijskih vibracionih transportera, koji se koriste za transport zrnastih i rasutih materijala u različitim procesnim industrijama, uključujući prehrambeni, farmaceutski i poljoprivredni sektor. Elektromagnetna sila generisana u ovim aktuatorima značajno zavisi od magnetnih osobina jezgra aktuatora. Magnetno kolo aktuatora sastoji se od vazdušnog zazora i feromagnetnog jezgra, koje je obično sastavljeno od gvozdениh limova sa nelinearnom magnetskom permeabilnošću, koja je u direktnoj zavisnosti od pobudne struje. Ovaj rad analizira dva karakteristična slučaja vezana za generisanje elektromagnetne pobudne sile: (1) kada se razmatra samo vazdušni zazor u magnetnom kolu i (2) kada se uzima u obzir kompletno magnetno kolo, uključujući i materijal sa nelinearnom magnetskom permeabilnošću. Uticaj magnetske nelinearnosti na pobudnu silu estimiran je primenom metode konačnih elemenata (MKE) u softverskom paketu *Maxwell*. U završnom delu rada prikazani su i analizirani ključni rezultati kompjuterskih simulacija za oba razmatrana slučaja.

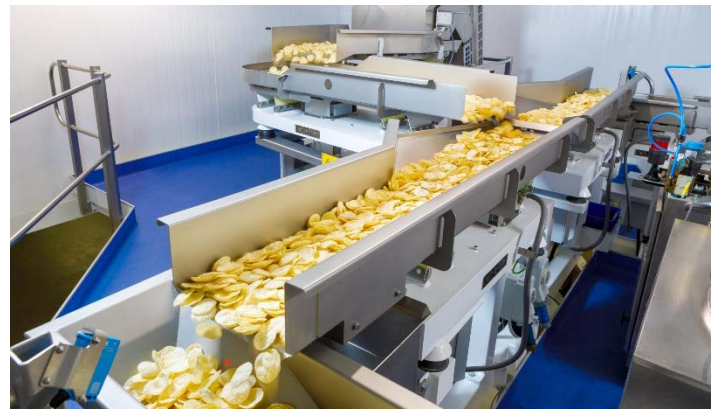
Ključne reči - Elektromagnet, aktuator, vibracioni transporter, MKE simulacije

I UVOD

Vibracioni transporter predstavlja soficirane uređaje koji koriste oscilatorne pokrete za efikasan transport materijala duž definisanih putanja u okviru određenog radnog okruženja. Ovi sistemi nalaze primenu u različitim industrijskim sektorima, uključujući prehrambenu industriju, farmaceutsku, hemijsku industriju, rudarstvo itd. [1]. Na primer na slici 1 je prikazano kako je kompanija *KMG Systems* rešila problem unutrašnjeg transporta materijala i precizno doziranje istog na izlazu [2]. Posebno su pogodni za prenos finih, sitnozrnih ili praškastih materijala, jer njihove vibracije omogućavaju kontinuiran i homogen protok bez zastoja. Koriste se za različite industrijske procese kao što su doziranje, sortiranje, razdvajanje, hlađenje i sušenje materijala. Zahvaljujući svojoj jednostavnoj konstrukciji, visokoj pouzdanosti i sposobnosti da precizno obavljaju kompleksne zadatke uz minimalno održavanje, ovi sistemi su neizostavni u savremenim industrijskim pogonima.

Osnovni element jednog takvog vibracionog transportera čini njegov aktuator, koji može biti mehaničke prirode, a u poslednje vreme sve češća su izvođenja aktuatora sa elektromagnetom. Mehanički aktuatori su zastupljeniji u teškim industrijama, gde nije potrebno fino doziranje, već su zahtevane velike sile, uglavnom zbog mlevenja ili preturanja materijala (uglja, šljunka,

pepela, itd.).



Slika 1. Primena vibracionih transportera u prehrambenoj industriji

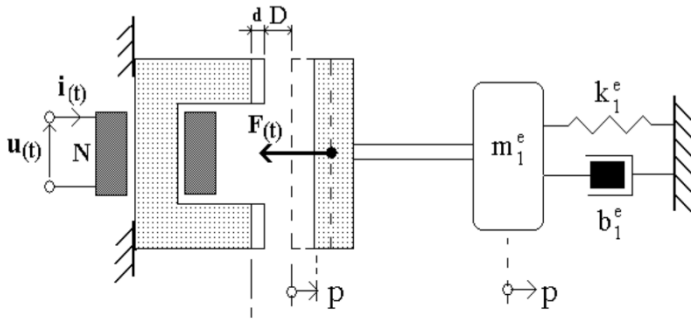
II MOTIVACIJA I DEFINISANJE PROBLEMA

Elektromagnetni aktuatori imaju ključnu ulogu u funkcionisanju vibracionih transportera, jer generišu potrebne oscilacije za kretanje materijala. U poređenju sa mehaničkim aktuatorima, elektromagnetni aktuatori pružaju niz značajnih prednosti [3]:

- omogućavaju preciznu kontrolu frekvencije i amplitude vibracija, što rezultira većom preciznošću u transportu i obradi materijala,
- elektromagnetni aktuatori rade tiše i imaju smanjen nivo habanja, što produžava njihov radni vek i smanjuje troškove održavanja,
- njihova sposobnost brze reakcije na promene u opterećenju čini ih idealnim za dinamičke industrijske procese.

Elektromagnetna sila vibracionog aktuatora je u velikoj meri određena magnetnim svojstvima materijala od koga je sačinjen sam aktuator. Magnetno kolo vibracionog aktuatora se sastoji od vazdušnog procepa i ostatka kola koga čine gvozdени limovi određene magnetne permeabilnosti, koja je nelinearna funkcija pobudne struje elektromagnetnog aktuatora. Na slici 2 prikazana je šema jednog elektromagnetnog aktuatora [4]. Namotaji su obmotani oko gvozdениh limova ukupno N puta i kroz njih protiče električna struja $i(t)$. Napon između krajeva provodnika $u(t)$ je takođe u funkciji vremena. Na jezgro elektromagneta je nalepljen nemagnetni materijal, da se ne bi zatvaralo magnetno kolo. Debljina brone je definisana parametrom d , a početna vrednost zazora u magnetnom kolu je $2D$. Kotva je kruto vezana

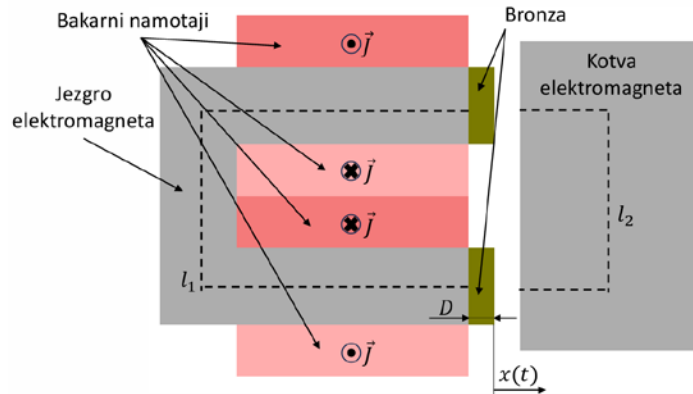
za vibraciono korito. U opštem slučaju, kompozitne elastične opruge su modelovane pomoću Kelvin-Voigtovog modela deformabilnog tela, s obzirom da su pomeraji elastičnih i viskoznih elemenata identični [5].



Slika 2. Šema elektromagnetnog vibracionog aktuatora sa mehaničkim opterećenjem

Tokom rada vibracionog transportera, odnosno elektromagnetnog vibracionog aktuatora, generiše se privlačna sila $F(t)$, koja je privlačnog karaktera. S obzirom da se većina magnetne energije nalazi unutar vazdušnog procepa, opšteprihvaćena je inženjerska praksa zanemarivanja dela konture magnetnog kola unutar magnetika. Drugim rečima, zanemaruje se uticaj magnetnog zasićenja u konačnom izrazu za elektromagnetnu silu F .

U ovom istraživanju izvršeno je modeliranje uticaja magnetnog zasićenja na pobudnu silu (F) za konkretan slučaj elektromagnetnog vibracionog aktuatora, slika 3. Magnetno kolo se sastoji od dva nelinearna magnetna materijala čije su srednje linije dužine l_1 i l_2 , a magnetna indukcija je uneta u softver numerički pomoću krive magnetisanja koja je prikazana na slici 4. Oko magnetnog jezgra su obmotani bakarni namotaji, ukupno N puta i kroz njih protiče gustina električne struje J .



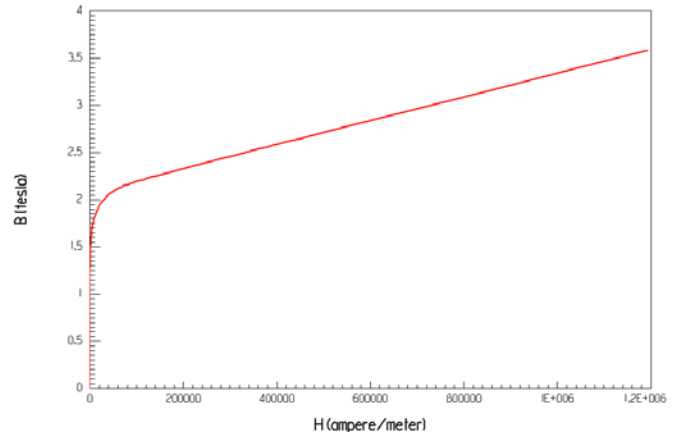
Slika 3. Model elektromagneta korišćen u okviru Maxwell softverskog paketa za MKE analize

Vazdušni procep, koji u posmatranom trenutku razdvaja kotvu od jezgra sa namotajima ima vrednost $D+x(t)$, pri čemu je D debljina bronzanog umetka, koji služi da spreči slepljivanje kotvu sa jezgrom elektromagneta. Poprečni presek bronzanog umetka i jezgra elektromagneta ima površinu jednaku A .

Kako je elektromagnetna sila u vazdušnom procepu data sa:

$$F = \frac{1}{2} B_0 \cdot H_0 \cdot 2A = \frac{H_0^2}{\mu_0} \cdot A \quad (1)$$

gde su B_0 intenzitet magnetne indukcije u vazdušnom procepu, H_0 intenzitet vektora jačine magnetnog polja i μ_0 magnetna permeabilnost vazduha. U daljem izlaganju posmatraće se da je prostor koji zauzima bronzini umetak ispunjen vazduhom, pa će i magnetna permeabilnost bronzine u tom slučaju takođe iznositi μ_0 . uticaj magnetnog zasićenja posmatraće se preko intenziteta vektora jačine magnetnog polja H unutar vazdušnog procepa.



Slika 4. Kriva magnetisanja za razmatrani magnetik

Polazeći od uopštenog Amperovog zakona $\oint H dl = \int J dS$ za konturu čiji je diferencijalni element dl sa vektorom jačine magnetnog polja H , koja opisuje površ S kroz koju protiče gustina električne struje data sa J , može se pisati sledeće:

$$\begin{aligned} 2H_0(D+x(t)) + H_m(l_1 + l_2) &= N \cdot i(t) \\ 2 \frac{B_0}{\mu_0} (D+x) + H_m(i, x) \cdot l_m &= N \cdot i \\ B_0 &= \frac{\mu_0 [N \cdot i - H_m(i, x) \cdot l_m]}{2(D+x)} \end{aligned}$$

S obzirom da je pobudna sila u vazdušnom procepu data pomoću jednačine (1), dalje sledi:

$$F_0 = - \frac{\mu_0 A}{4(D+x)^2} [N \cdot i - H_m(i, x) \cdot l_m]^2$$

Nakon kvadriranja i zanemarivanja člana nižeg reda izraz za elektromagnetnu silu vibracionog aktuatora, prethodni izraz se svodi na:

$$F_0 = - \frac{\mu_0 A}{4(D+x)^2} [N^2 \cdot i^2 - 2H_m(i, x) \cdot l_m \cdot N \cdot i] \quad (2)$$

Zanemarivanjem drugog člana u zagradi u prethodnom izrazu, dobija se klasičan izraz za elektromagnetnu silu koji se koristi za proračun elektromagnetnih aktuatora u industriji:

$$F_0 = - \frac{\mu_0 A N^2 \cdot i^2}{4(D+x)^2} \quad (3)$$

Kako su promenljive veličine u datom sistemu pomeraj kotve $x(t)$ i vektor gustine električne struje $J(t) = N \cdot i(t)$, izvršene su MKE simulacije za različita moguća stanja sistema. U izrazu za elektromagnetnu silu pomeraj kotve ne figuriše direktno na rezultat unutar zagrade, već se odražava preko intenziteta vektora jačine magnetnog polja u magnetiku, tj. $H_m(i, x)$. Ukoliko bi se

ovaj problem rešavao grafičkom metodom nalaženjem radne tačke sistema, promena koordinate $x(t)$ odgovara promeni nagiba radne prave sistema. S obzirom da je ovaj uticaj mnogo manji od uticaja jačine struje, simulacije su vršene za konstantnu vrednost x . Promena $i(t)$ odgovara paralelnom pomeraju radne prave na grafiku. Kako je promenljiva $i(t)$ periodičnog karaktera, uzima se njena najveća vrednost, tj. $I(t)$.

Uzevši u obzir da je u industrijskoj primeni intenzitet električne struje ide i do 37,5 A [6], simulacije su izvršene za vrednosti električne struje od: 0,5, 1, 5, 10, 20 i 37,5 A. Da se ne bi rad preterano opterećivao slikama, rezultati simulacije za krajnje slučajeve (0,5 A i 37,5 A) dati su pomoću slike iz simulacionog softvera i opisani u sledećem poglavlju, dok su rezultati svih dvanaest simulacija dati u okviru tabele 1. Dobijene vrednosti su maksimalne očitane vrednosti sa grafika u softverskom paketu za simulaciju elektromagnetnih polja.

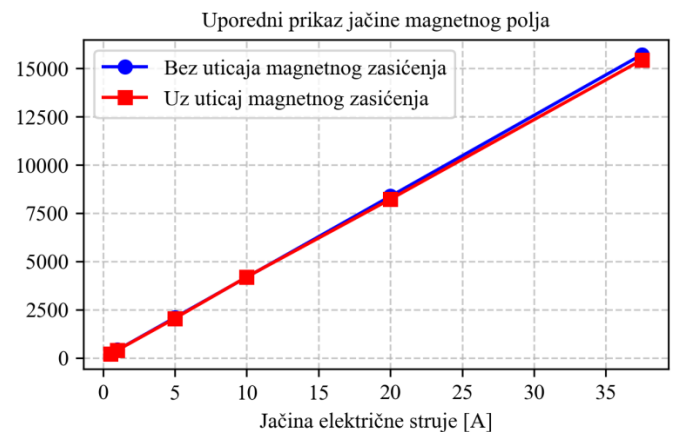
III MKE SIMULACIJE

MKE simulacije su izvršene pomoću softverskog paketa *Maxwell* za 2D analizu elektromagnetnih polja. Na slici 3. je prikazan presek elektromagneta u vertikalnoj ravni korišćen za potrebe simulacije. Nakon definisanja geometrije elektromagneta, neophodno je uneti i karakteristike materijala. Krivu magnetisanja je moguće uneti preko tabelarnih podataka u okviru .txt fajlova. Kako su od interesa vrednosti unutar vazdušnog procepa, gustina mreže (eng. "mesh") u tom delu data je gušće, dok je mreža elemenata najšira u delu koji predstavlja magnetik, odnosno u oblasti namotaja elektromagneta. Vektori gustine električne struje su uneti prema smerovima datim na slici 3. Olakšavajuća okolnost je što softver ima mogućnost unosa konačne vrednosti za jačinu električne struje po konačnoj površi provodnika, tj. kalema.

Ukupno je izvršeno dvanaest simulacija. U okviru prve grupe simulacija, za navedenih šest jačina električne struje, posmatran je isključivo uticaj magnetnog polja u vazdušnom procepu. Što se tiče simulacionog softvera, ovaj efekat je postignut zamenom stvarnih numeričkih vrednosti krive magnetisanja sa veoma visokim vrednostima. Matematički posmatrano, ovaj postupak identičan je izjednačavanjem sa nulom drugog sabirka u zagradi u okviru jednačine (2). Rezultati ovih šest simulacija dati su unutar druge kolone u okviru tabele 1.

Druga grupa simulacija predstavlja stvarnu vrednost vektora jačine magnetnog polja, gde je uzeto u obzir kompletno magnetno kolo, tj. srednja linija magnetnog jezgra, srednja linija

kola kroz kotvu i dvostruka vrednost vazdušnog zazora. Vrednosti jačine magnetnog polja na ivicama magnetnog jezgra date su unutar treće kolone u okviru tabele 1. Može se uočiti blagi pad u odnosu na vrednosti iz druge kolone. Dodatno, izračunata je apsolutna razlika između ova dva slučaja, iako apsolutna razlika ima tendenciju rasta s porastom jačine električne struje, relativna razlika ostaje na približno identičnom nivou, ispod 2%. Radi preglednosti, uporedni prikaz maksimalnih jačina magnetnog polja dat je na slici broj 5. Može se uočiti linearna zavisnost intenziteta vektora jačine magnetnog polja od jačine električne struje koja protiče kroz namotaje. Sa porastom struje raste i apsolutna greška između ova dva slučaja, te postaje uočljiva na grafiku. Za veće vrednosti jačine električne struje, razlika između ova dva slučaja bila bi znatno veća, jer bi došlo do izraženijih posledica nelinearnosti krive magnetisanja date na slici 4. Sa grafika se može uočiti da već od 20 kA/m počinje opadanje intenziteta magnetne indukcije. Za te vrednosti neophodne su mnogo veće jačine električne struje koje se ne koriste u industriji za napajanje vibracionih elektromagnetnih aktuatora.



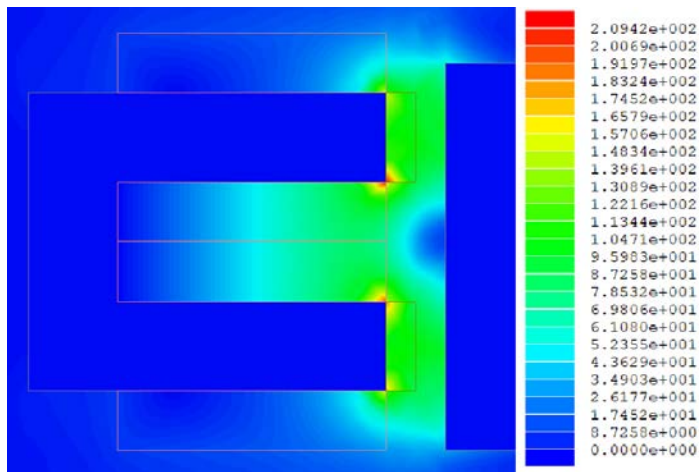
Slika 5. Uporedni prikaz maksimalnih jačina magnetnog polja

Na slici 6 je prikaz rezultata simulacije za slučaj jačine električne struje od 0,5 A pri čemu se uzima u obzir samo vazdušni procep. Desno od slike je data legenda jačine magnetne indukcije u A/m. Jasno je vidljivo da dolazi do velikog porasta intenziteta jačine magnetne indukcije na oštrim ivicama magnetnog jezgra. Maksimalna vrednost jačine magnetnog polja koja je dostignuta iznosi preko 200 A/m, dok je intenzitet jačine magnetnog polja unutar zazora znatno manja i iznosi oko 120 A/m. Takođe, usled

Tabela 1. Rezultati simulacije sa prikazanim apsolutnim i relativnim razlikama za odabrane jačine električnih struja

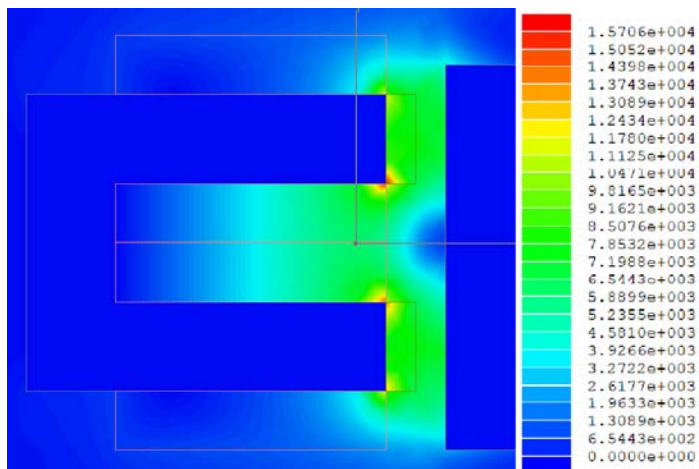
Jačina električne struje, I	Maksimalna jačina magnetnog polja		Apsolutna razlika [A/m] $\Delta = H_0 - H_M$	Relativna razlika [A/m] $\delta = \frac{H_0 - H_M}{H_0}$
	Bez uticaja magnetnog zasićenja, H_0 [A/m]	Uz uticaj magnetnog zasićenja, H_M [A/m]		
0,5 A	209,42	205,59	3,83	1,83%
1 A	418,84	411,19	7,65	1,83%
5 A	2.094,2	2.056	38,2	1,82%
10 A	4.188,4	4.199	69,4	1,66%
20 A	8.376,7	8.224	152,7	1,82%
37,5 A	15.706	15.429	286	1,82%

pojave rasipanja EM polja, na nekim mestima unutar bakarnog provodnika ostvaruje se jačina magnetnog polja i do čak 100 A/m.



Slika 6. Rezultat MKE simulacije za jačinu struje od 0,5 A, pri čemu se uzima u obzir samo vazdušni procep

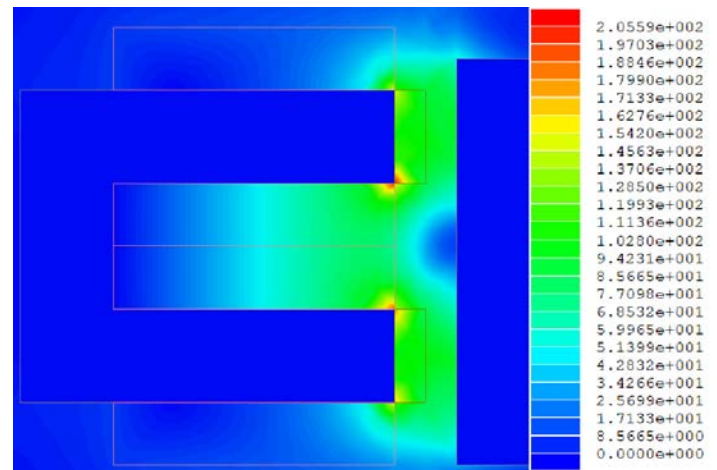
Na slici 7 je prikazan rezultat *Maxwell* simulacije za slučaj maksimalne jačine električne struje koja se nalazi u upotrebi u industriji. U pitanu je šesti slučaj iz tabele 1, tj. jačina struje od 37,5 A. Legenda sa jačinama magnetnog polja po rasteru MKE analize data je sa desne strane slike 6. Takođe, identično kao i u prethodnom slučaju, dolazi do porasta jačine magnetnog polja na ivicama magnetnog jezgra. Maksimalna vrednost jačine magnetnog polja u ovom slučaju iznosi čak preko 15,7 kA/m, dok je vrednost jačine magnetnog polja između magnetnog jezgra i kotve, tj. unutar vazdušnog procepa oko 9 kA/m. I u ovom slučaju ostvaruje se znatna vrednost jačine magnetnog polja unutar bakarnog provodnika i ona iznosi oko 7 kA/m, što je direktna posledica rasipanja elektromagnetnog polja.



Slika 7. Rezultat MKE simulacije za jačinu struje od 37,5 A, pri čemu se uzima u obzir samo vazdušni procep

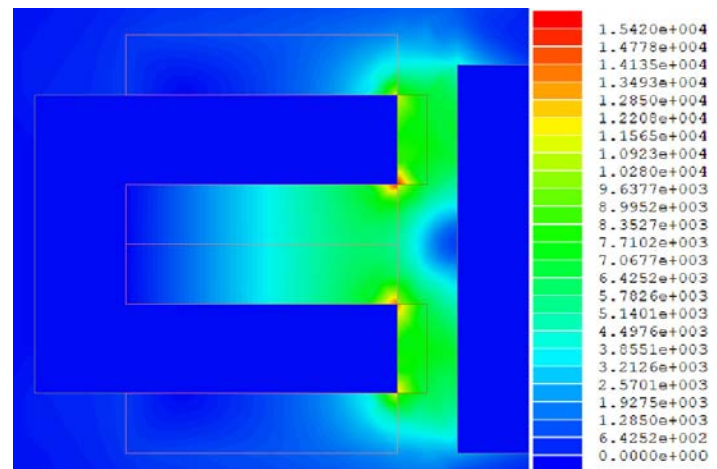
Na slici 8 je prikazana raspodela jačine magnetnog polja u prostoru oko elektromagneta, za jačinu struje od 0,5 A, pri čemu je uzet u obzir i magnetno zasićenje nelinearnog magnetika. Sa desne strane se nalazi legenda, gde su crvenom bojom označene

maksimalne vrednosti intenziteta jačine magnetnog polja, koje se ostvaruju na ivicama magnetnog jezgra. Za ovaj slučaj maksimalna vrednost iznosi oko 205 A/m, što je neznatno manje u odnosu na slučaj prikazan na slici 5.



Slika 8. Rezultat MKE simulacije za jačinu električne struje od 0,5 A, gde je uzeto u obzir celo magnetno kolo

Poslednja simulacija je izvršena sa jačinom električne struje od 37,5 A i uzeto je u obzir celo magnetno kolo, tj. i vazdušni procep i ostatak magnetnog kola (jezgro i kotva). Na slici 9 je prikazan rezultat pomenute simulacije. Maksimalna vrednost koju jačina magnetnog polja dostiže je, očekivano, na ivicama magnetnog jezgra i ona u ovom slučaju iznosi 15,42 kA/m, što jeste manje u odnosu na slučaj prikazan na slici 7.



Slika 9. Rezultati MKE simulacije za jačinu električne struje od 37,5 A, gde je uzeto u obzir celo magnetno kolo

V ZAKLJUČAK

Na osnovu izvedenih simulacija sledi da je posledica aproksimacije izraza za elektromagnetnu silu vibracionog aktuatora izostavljanjem uticaja magnetnog zasićenja odgovara relativnoj grešci ispod 2%. U zavisnosti od potreba i željenih rezultata, kao i povećanja brzine računanja, ovaj uticaj je moguće zanemariti za navedene slučajeve ($x = 5\text{mm}$; $I = 0,5...37,5\text{A}$). Sa prikazanih simulacija se može se uočiti da je najveća koncentracija gustine magnetne energije na ostrim ivicama

magnetika. S obzirom da je tema rada uticaj magnetskog zasićenja, odnosno karakteristike materijala, sam oblik magnetika (tj. pojava šiljatih ivica) nije uzet u razmatranje. Slični zaključci važe i za pojavu rasipanja EM polja

ZAHVALNICA

Istraživanje u ovom radu je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-136/2025-03/200034 od 04.02.2025.

LITERATURA

- [1] Goncharevich, I.F., Frolov, K.V., Rivin, E.I. *Theory of Vibratory Technology*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990.
- [2] KMGSystems vibracioni dozer slika, <https://www.kmgsystems.com/machine/proportioning-control-vibratory-conveyors/> [pristupljeno 04. 03.2025]

- [3] Fayed, M.E., Skocir, T. *Mechanical Conveyors: Selection and Operation*, Technomic Publishing AG, Basel, Switzerland, 1996.
- [4] Despotovic, Z., Urukalo, Dj., Lecic, M., Cosic, A. Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results, *Applied Mathematical Modelling*, Vol., 41, pp.: 1-24, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2016.09.010>
- [5] Nijenhuis, M., Meijaard, J. P., Brouwer, D.M. Improved dynamic performance in flexure mechanisms by overconstraining using viscoelastic material, *Precision Engineering*, Vol. 63, pp. 115-125, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.02.002>
- [6] AViTEQ katalog proizvoda, <https://www.aviteq.com/en/product/magnetic-vibrator/> [pristupljeno 04.03.2025]

AUTORI

Uroš Ilić – mast. inž. maš., Institut Mihajlo Pupin, uros.ilic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-3955-8995](https://orcid.org/0000-0003-3955-8995)

dr Željko Despotović – dipl. el. inž., Institut Mihajlo Pupin, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)

Modelling and Analysis of Magnetic Saturation Effects on the Electromagnetic Force in Vibratory Actuators

Abstract – Electromagnetic vibration actuators play a crucial role as the drive elements of industrial vibration conveyors, which are used to transport granular and bulk materials in various process industries, including the food, pharmaceutical and agricultural sectors. The electromagnetic force generated in these actuators significantly depends on the magnetic properties of the actuator core. The magnetic circuit of the actuator consists of an air gap and a ferromagnetic core, which is usually composed of iron sheets with a non-linear magnetic permeability, which is directly dependent on the excitation current. This paper analyses two characteristic cases related to the generation of electromagnetic excitation force: (1) when considering only the air gap in the magnetic circuit and (2) when considering the complete magnetic circuit, including the material with nonlinear magnetic permeability. The influence of magnetic nonlinearity on the excitation force was estimated using the finite element method (FEM) in the Maxwell software package. In the final part of the paper, the key results of computer simulations for both considered cases are presented and analysed.

Index terms – Electromagnet, Actuator, Vibration transport, FEA simulations