

Analiza magnetnog polja i privlačne sile elektromagnetnog separatora metodom konačnih elemenata

Analysis of the Magnetic Field and Attractive Force of the Electromagnetic Separator Using the Finite Element Method

Željko V. Despotović*, Đorđe M. Lekić**

* Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

** Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci, Bosna i Hercegovina

Rezime - U radu je data analiza magnetnog polja i privlačne elektromagnetne sile snažnog elektromagneta koji se koristi u sklopu elektromagnetnog separatora (EMS) za izdvajanje metalnih delova na transportnim trakama na dopremi uglja. Analiza je urađena metodom konačnih elemenata korišćenjem programskog paketa FEMM 4.2. Za modeliranje magnetskog kola EMS je definisan dvodimenzionalni aksijalno-simetrični model i simuliran je jedan karakteristični presek magnetskog kola. Pošto se razmatra vremenski nepromenljivo magnetsko polje koje potiče od konstantne jednosmerne struje, usvojen je magnetostatički tip simulacije. U radu su prikazani rezultati simulacije koji se odnose na vrednost indukcije magnetnog polja i privlačne sile elektromagneta za nekoliko karakterističnih tipova tereta elektromagneta, struja elektromagneta i rastojanja, od interesa. Rezultati simulacije su primenjeni za projektovanje elektromagneta u sklopu postrojenja za detekciju i izdvajanje metalnih delova na transportnoj traci na dopremi uglja sa površinskog kopa „Drmno“ na TE „Kostolac“.

Gljučne reči - elektromagnet, indukcija, privlačna sila, FEMM analiza, elektromagnetni separator

Abstract - The paper provides an analysis of the magnetic field and the attractive electromagnetic force of a powerful electromagnet that is used as part of an electromagnetic separator (EMS) to separate metal parts on conveyor belts for coal delivery. The analysis was done using the finite element method using the FEMM 4.2 software package. For the modelling of the EMS magnetic circuit, a two-dimensional axis-symmetric model was defined and one characteristic section was simulated. Since a time-invariant magnetic field originating from a constant direct current is considered, a magnetostatic type of simulation is adopted. The paper presents the simulation results related to the value of the magnetic field induction and the attractive force of the electromagnet for several characteristic distances of interest. The results of the simulation were applied as part of the design of the plant for the detection and extraction of metal parts on the conveyor belt for the delivery of coal from surface mine "Drmno" to the thermal power plant (TPP) "Kostolac".

Index Terms - Electromagnet, Induction, Attraction force,

FEMM analysis, Electromagnetic separator

I UVOD

Elektromagnetna separacija je najčešće korišćena metoda za odvajanje čeličnih predmeta iz materijala kao što su na primer ugalj, koji se koristi kao energent na termoelektranama i toplanama, zemlja koja se koristi u tehnologiji ciglana, kreč u sistemima za desumporizaciju, cement i sl.. Takođe ova metoda se primenjuje u sistemima za drobljenje, sitnjenje i obradu kamena i minerala [1-5].

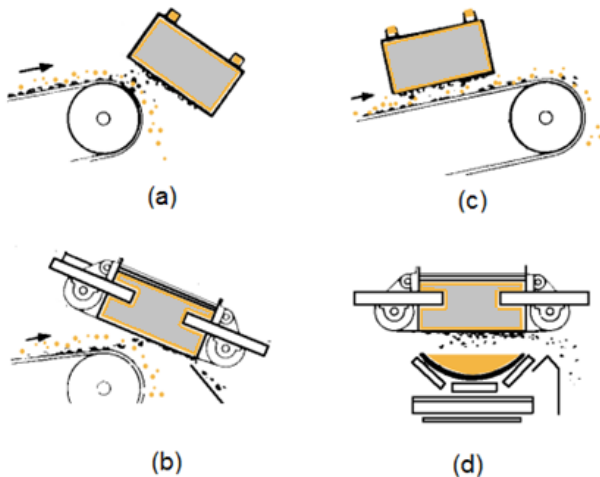
U pomenutim industrijama i pripadajućim tehnološkim procesima se veoma često pojavljuju čelični komadi, odvaljeni od alatnih delova i (ili) mašina. Ovi delovi ne smeju doći u mlinove za obradu, drobljenje ili transport materijala. Primenom jakih elektromagneta i relativno velikih intenziteta magnetnih polja, izdvojeni komadi se skupljaju na polovima elektromagneta [2]. Ovde treba napomenuti da je za skidanje neželjenih metalnih delova potrebno isključiti elektromagnet i skinuti sa površine nakupljene neželjene metalne delove i dodatno sa elektromagnetom primeniti adekvatni transporter koji će stalno odnositi nakupljeni čelični materijal [6,7].

Na osnovu prethodno rečenog, sistemi za separaciju čeličnih delova mogu biti bazirani na tzv. „ručnom čišćenju“ (RČ) (engl. *Manual Cleaning*) sistemi ili na tzv. „samo-čišćenju“ (SČ) (engl. *Self Cleaning*) [7].

Jedinice za ručno čišćenje moraju se periodično isključivati da bi se gvozdeni delovi nakupljeni na prednjoj strani elektromagneta, mogli odstraniti. Ovi magneti su pogodni za aplikacije u kojima se očekuje samo povremeno zaostalo gvožđe u primarnom materijalu. Elektromagneti su obično vezani vešanjem (okačeni) na transportna kolica, tako da se mogu skloniti sa transportera pre nego što se čelični izdvojeni deo otpusti.

Samočisteći suspendovani elektromagneti obezbeđuju neprekidno i automatsko uklanjanje zaostalih čeličnih delova i u sklopu svoje konstrukcije poseduju veoma robustan transporter predviđen za teške uslove rada koji se susreću u ovim sistemima. Ovi sistemi se preporučuju u onim slučajevima gde se očekuje velika količina zaostalih čeličnih delova ili gde je ograničen pristup elektromagnetu u svrhu njegovog čišćenja.

Elektromagnetni separator se montira poprečno ili uzdužno na mestima presipa na krajevima traka transporter, iznad transportne trake u horizontalnom ili kosom položaju. Mesto i položaj ugradnje zavisi od vrste i rastresitosti transportovanog materijala. Pošto magnet oko sebe formira jako magnetno polje, to se u neposrednoj blizini ovog polja ne smeju nalaziti čelični predmeti koji oko sebe formiraju sekundarna polja. Načini montaže elektromagneta za nekoliko konkretnih industrijskih aplikacija su dati na Slici 1 [7,8].



Slika 1. Načini montaže elektromagneta za nekoliko industrijskih aplikacija elektromagnetnih separatora; (a) RČ na presipu transportne trake, (b) SČ na presipu transportne trake, (c) RČ neposredno iznad transportne trake, (d) SČ neposredno iznad transportne trake.

Najefikasniji sistemi odvajanja bazirani na RČ i SČ (ukoliko to ugradne mere dozvoljavaju), su oni koji se montiraju na presipnom mestu, kao što pokazuju Slike 1(a),(b). Ovo je pogodna opcija jer u ovom slučaju se teret kreće direktno ka licu elektromagneta. Kada je magnet u ovoj poziciji, bitno je napomenuti da remenica transportne glave bude napravljena od nemagnetnog materijala.

U drugom slučaju elektromagnet se nalazi iznad pokretnog sloja materijala i postavljen je upravno u odnosu na glavni transporter. Položaj elektromagneta za slučaj RČ ili SČ sistema je prikazan na Slikama 1(c),(d). Ova pozicija zahteva jači magnet i ne preporučuje se za prevelike brzine transportne trake ili u slučajevima kada se čelični delovi nalaze duboko u transportujućem materijalu.

U ovom radu je dat dizajn elektromagneta i analiza njegovih radnih karakteristika (privlačna sila i magnetna indukcija) prema tehničkim zahtevima za sistem za separaciju čeličnih delova sa transportnih traka na PK „Drmno“. U sklopu dizajna je uzeto u obzir više faktora: (1) veličina materijala koji se transportuje, (2) vrsta materijala (njegova gustina i težina), (3) tip i minimalna veličina čeličnih delova koje treba ukloniti, (4) maksimalna granulacija materijala, (5) količina metalnih delova u materijalu, (6) kapacitet transportne trake dat u t/h, (7) širina transportne trake, (8) brzina transportne trake, (9) nagib transportne trake, (10) prečnik remenice glave, (11) materijal remenice glave, (12)

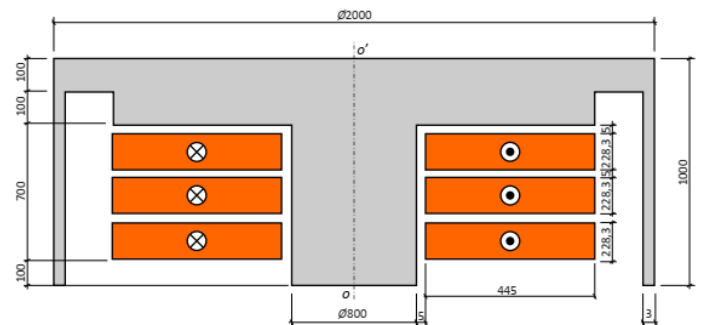
ugao ulegnuća transportne trake, (13) temperatura okoline, (14) dostupno napajanje naizmeničnom ili jednosmernom strujom, (15) zahtev za magnetnom indukcijom od 80mT na rastojanju od 0,7 m od elektromagneta.

Pri dimenzionisanju elektromagneta je veoma bitno što tačnije modelirati magnetno polje elektromagneta separatora i nakon toga izvršiti njegov konačni proračun i proračun elektromagnetne sile separatora. U referencama [9-11] se na sveobuhvatan način daje proračun elektromagneta separatora metalnih delova. U referenci [10] je dat detaljan prikaz proračuna sile snažnog elektromagneta i u njemu je objašnjen način na koji sila solenoida varira u zavisnosti od prečnika zavojnice, dužine namotaja, širine žice, napona napajanja, gustine pakovanja i broja namotaja.

U najvećem broju slučajeva dimenzionisanja elektromagneta u ovim aplikacijama se koriste FEMM 1.2 i FEMM 4.2 [12,13] programski paketi za modeliranje i proračun. Proračun i simulacije elektromagneta separatora koji su razmatrani u ovom radu su urađeni u programskom paketu FEMM 4.2.

II POSTAVKA PROBLEMA

U ovom poglavlju je navedena postavka problema i navedeni su osnovni podaci o korišćenom softveru i modelima. Predmet analize je magnetno kolo elektromagneta separatora čiji su prikaz i osnovne dimenzije date na Slici 2.



Slika 2. Prikaz i dimenzije magnetnog kola elektromagneta separatora (date u milimetrima)

Namotaj elektromagneta (označen narandžastom bojom na slici 2) ima ukupno $N=2100$ navojaka i napaja se konstantnom jednosmernom strujom jačine I u opsegu od 50 A do 150 A, što odgovara gustini struje J u opsegu $1\div 3$ A/mm². Za tri različite vrednosti jačine struje - $I_1=50$ A, $I_2=100$ A i $I_3=150$ A, potrebno je analizirati magnetno polje usamljenog elektromagneta, kao i magnetno polje elektromagneta u prisustvu čeličnog predmeta na udaljenosti do $d=0,7$ m od centralnog dela elektromagneta (označenog tačkom „o“ na Slici 2). Pri ovome su razmatrani slučajevi čeličnog predmeta u obliku punog cilindra prečnika 2 m i visine 7 mm (približna masa čeličnog cilindra je u ovom slučaju 160 kg) i čeličnog predmeta u obliku pune kugle prečnika 140 mm (približna masa čelične kugle u ovom slučaju je 10 kg).

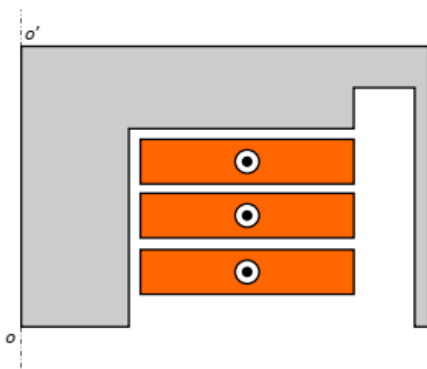
Za navedene tri različite vrednosti jačine struje i za slučaj usamljenog elektromagneta, potrebno je odrediti: (1) raspodelu magnetnog polja u okolini elektromagneta, (2) amplitudu vektora

magnetne indukcije u funkciji udaljenosti od centralnog dela elektromagneta na udaljenosti do 0,7 m (3) induktivnost namotaja u funkciji jačine struje.

Takođe za navedene vrednosti struja i za slučaj elektromagneta u prisustvu čeličnog cilindra i čelične kugle, potrebno je odrediti: (1) raspodelu magnetnog polja u okolini elektromagneta za udaljenost čeličnog predmeta od 0,7 m od centralnog dela elektromagneta, (2) amplitudu vektora magnetne indukcije u funkciji udaljenosti od centralnog dela elektromagneta za udaljenosti do 0,7 m, pri čemu se usvaja da se čelični predmet nalazi na udaljenosti 0,7 m od centralnog dela elektromagneta, (3) induktivnost namotaja u funkciji jačine struje i udaljenosti čeličnog predmeta od centralnog dela elektromagneta, (4) amplitudu vektora elektromagnetne sile koja deluje na čelični predmet u funkciji udaljenosti čeličnog predmeta od centralnog dela elektromagneta (na maksimalnom rastojanju od 0,7 m)

III MODELIRANJE I SIMULACIJA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

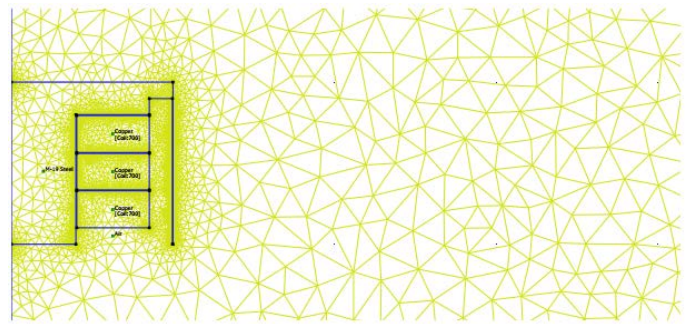
Za modeliranje magnetnog kola elektromagneta separatora u ovom slučaju je korišćen programski paket FEMM 4.2. Pošto je magnetsko kolo elektromagneta simetrično u odnosu na osu rotacije O-O', model je definisan kao dvodimenzionalni osnosimetrični i simuliran je samo jedan presek kao što je prikazano na Slici 3.



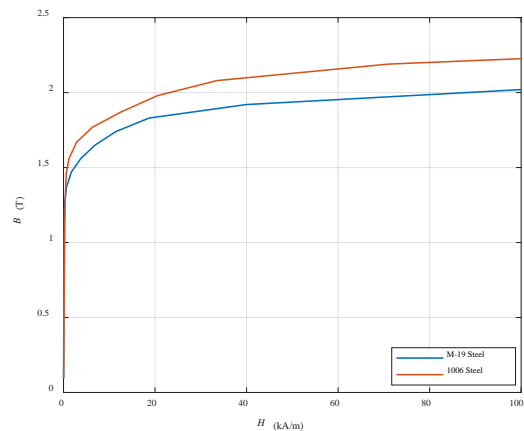
Slika 3. Dvodimenzionalni osnosimetrični model elektromagneta elektromagnetnog separatora

Pošto se razmatra vremenski nepromenljivo magnetno polje koje potiče od konstantne jednosmerne struje, usvojen je magnetostatički tip simulacije. Magnetno polje u okolini elektromagneta je simulirano u prostoru koji je obuhvaćen sferom prečnika 7 m, na čijoj površini je nametnut granični uslov koji simulira beskonačno prostranstvo za prvih sedam prostornih harmonika magnetskog polja (komanda *mi_makeABC* (7,7,0,0,0) u programskom paketu FEMM 4.2). U svim simulacijama je korišćena mreža konačnih elemenata sa prosečno 17755 elementa i 34922 čvora. Prikaz generisane mreže konačnih elemenata je dat na Slici 4.

Za materijal jezgra elektromagneta je usvojeno gvožđe M-19 (kriva magnećenja data na Slici 5). Za materijal namotaja elektromagneta je usvojen bakar. Za materijal čeličnog predmeta u blizini elektromagneta je usvojen čelik 1006 sa niskim sadržajem ugljenika (kriva magnećenja data na Slici 5).



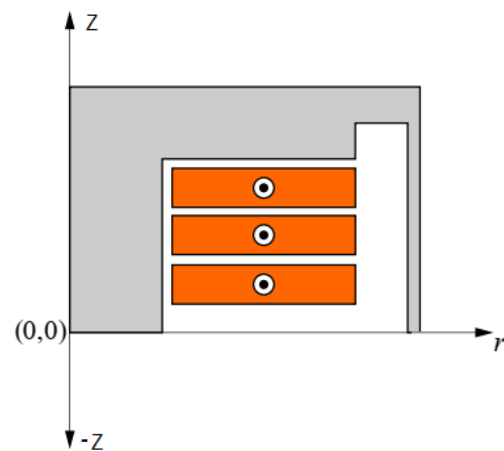
Slika 4. Detalj generisane mreže konačnih elemenata sa geometrijom EM separatora



Slika 5. Magnetne B-H krive za čelike M19 i 1006

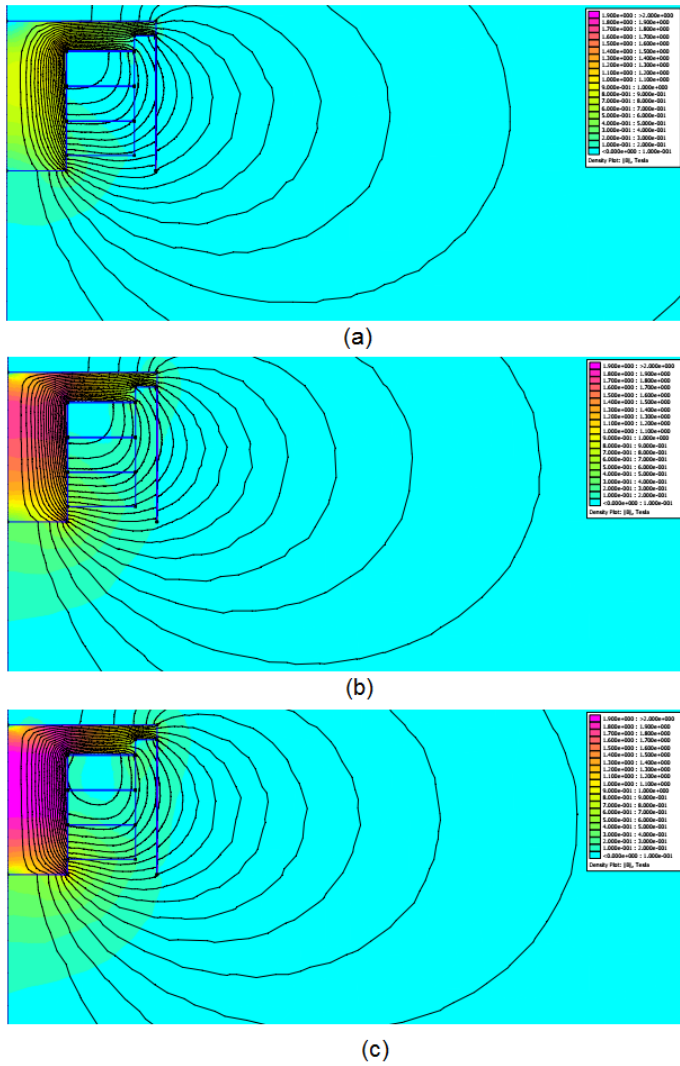
III ANALIZA ELEKTROMAGNETA SEPARATORA BEZ TERETA

U ovom poglavlju su dati rezultati analize magnetnog polja usamljenog elektromagneta (bez ikakvog čeličnog predmeta u blizini). Rezultati su predstavljeni u vidu zavisnosti amplitude vektora magnetne indukcije od koordinata r i $-z$ cilindričnog koordinatnog sistema, kao što je prikazano na Slici 6.



Slika 6. Cilindrični koordinatni sistem ($r,-z$) vezan za elektromagnet

Na Slikama 7(a), (b), (c) su prikazane raspodele magnetnog polja za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A).

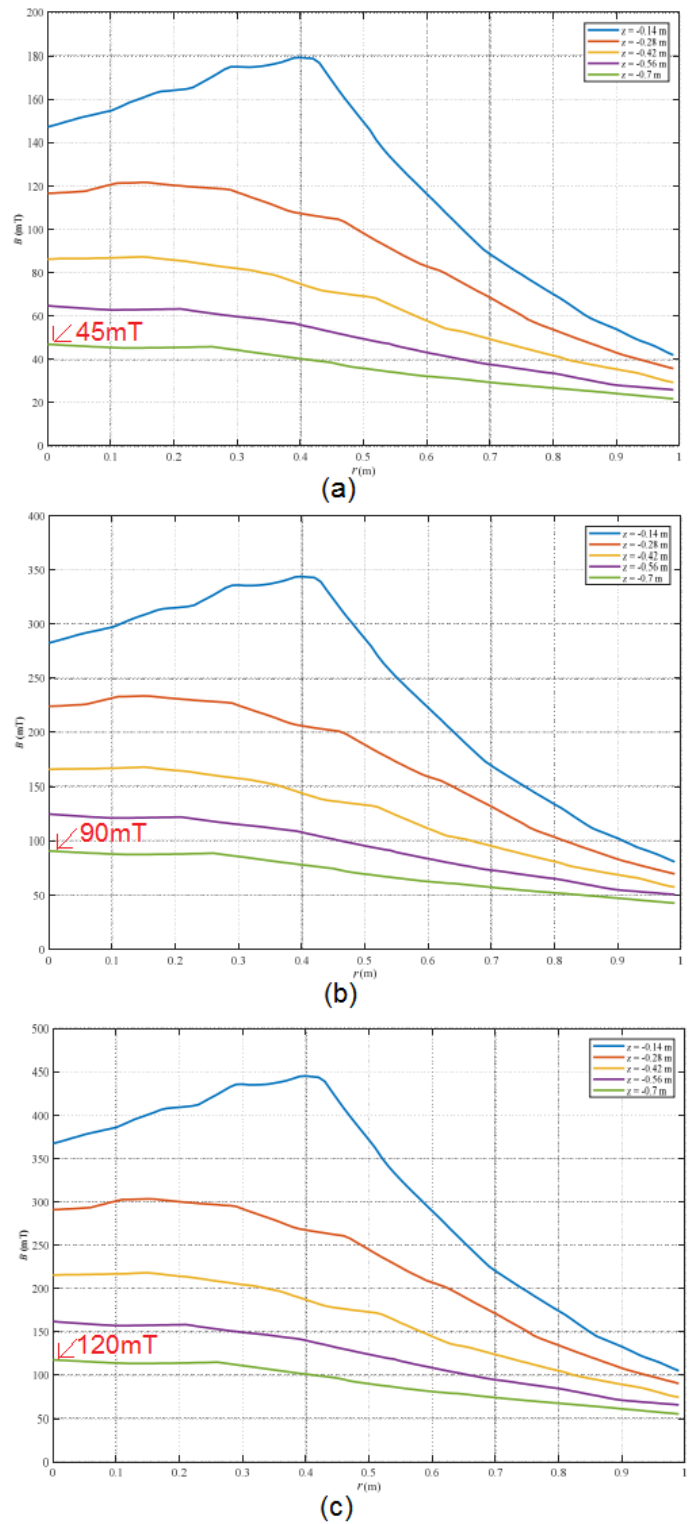


Slika 7. Raspodela magnetnog polja za slučaj elektromagneta bez tereta (usamljeni elektromagnet) i za tri različite vrednosti struje elektromagneta; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

Na Slikama 8(a), (b), (c) su prikazane zavisnosti amplitude magnetne indukcije od koordinate r , za pet različitih koordinata z ($z=-0,14$ m, $-0,28$ m, $-0,42$ m, $-0,56$ m, $-0,7$ m) i tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A).

Na osnovu dobijenih rezultata prikazanih na Slici 8(a) se zaključuje da je za koordinate od interesa za praktičnu realizaciju $r=0$ m i $z=-0,7$ m i za jačinu struje elektromagneta $I_1=50$ A, amplituda vektora indukcije $B_1=45$ mT.

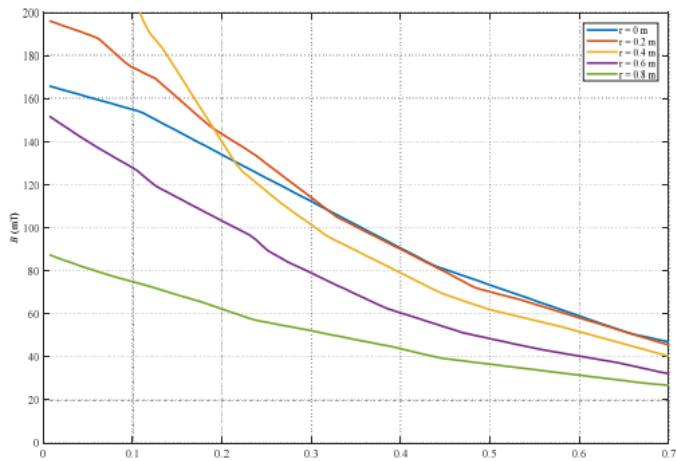
Za iste vrednosti koordinata i za jačinu struje $I_2=100$ A, sa Slike 8(b) se dobija da je amplituda vektora indukcije $B_2=90$ mT, dok se za slučaj kada je struja elektromagneta jednaka $I_3=150$ A, dobija da je amplituda vektora indukcije $B_3=120$ mT, kao što pokazuje Slika 8(c). Interesantno je da amplituda vektora indukcije ima maksimalne vrednosti 180 mT, 250 mT, 450 mT u svim navedenim slučajevima 50 A, 100 A, 150 A, respektivno za vrednost koordinata $z=-0,14$ m i $r=0,4$ m, ali treba napomenuti da ove vrednosti nisu od interesa pošto su dimenzije transportne trake i ugradne mere na realnom sistemu diktirajući faktor.



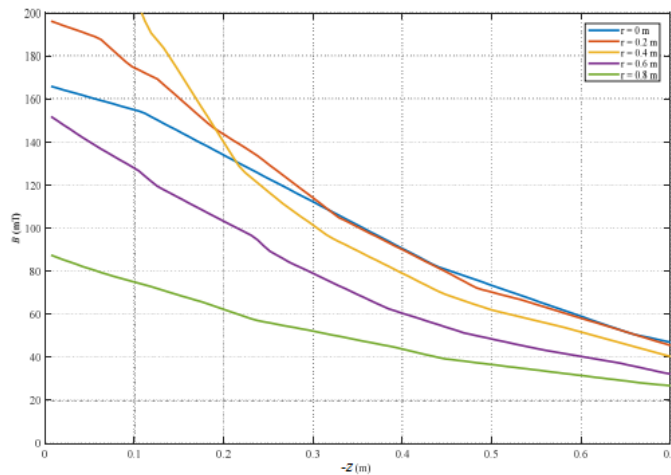
Slika 8. Raspodele amplituda vektora magnetne indukcije magnetnog polja za slučaj elektromagneta bez tereta u funkciji koordinate r , za pet različitih koordinata z i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

Na Slikama 9(a), (b), (c) su prikazane zavisnosti amplitude magnetske indukcije od koordinate $-z$, za pet različitih vrednosti koordinate r ($r = 0, 0,2$ m, $0,4$ m, $0,6$ m, $0,8$ m) i za tri različite

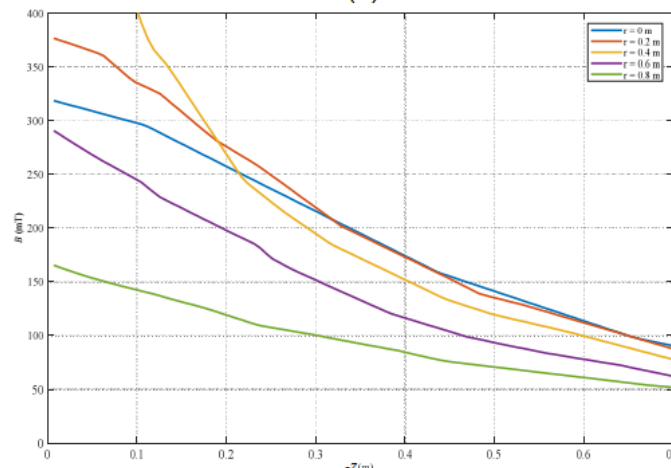
vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A).



(a)



(b)



(c)

Slika 9. Raspodele amplituda vektora magnetne indukcije magnetnog polja za slučaj elektromagneta bez tereta u funkciji koordinate $-z$, za pet različitih vrednosti koordinate r i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

U ovom slučaju je za sve tri vrednosti struje elektromagneta amplituda vektora magnetne indukcije za svaku vrednost

koordinate r opadajuća funkcija rastojanja $-z$. Do sličnih zaključaka u pogledu vrednosti amplitude vektora magnetne indukcije se može doći za usvojenu vrednost koordinata od interesa za praksu $r=0$ m i $z=-0,7$ m.

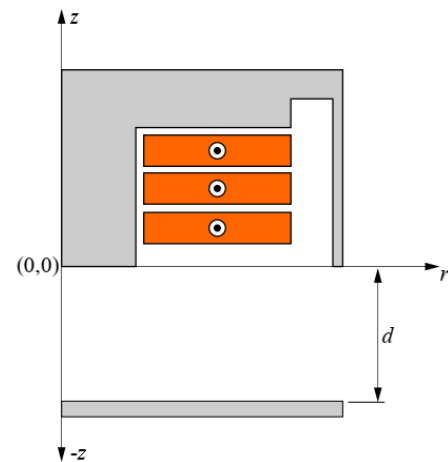
U Tabeli 1 je data zavisnost induktivnosti namotaja od jačine struje elektromagneta za slučaj elektromagneta bez tereta.

Tabela 1. Zavisnost induktivnosti elektromagneta od jačine struje (EM bez tereta)

Struja (A)	50	100	150
Induktivnost (H)	16,51	15,69	13,17

IV ANALIZA ELEKTROMAGNETA SEPARATORA SA TERETOM U OBLIKU ČELIČNOG CILINDRA

U ovom poglavlju su dati rezultati analize magnetskog polja elektromagneta sa teretom u obliku čeličnog cilindra prečnika 2 m, visine 7 mm (masa 160 kg) na udaljenosti d koja se menja od 0 m do 0,7 m u odnosu na centralni deo elektromagneta (početak koordinatnog sistema je prikazan na Slici 10).



Slika 10. Cilindrični koordinatni sistem vezan za elektromagnet i čelični cilindar na udaljenosti d

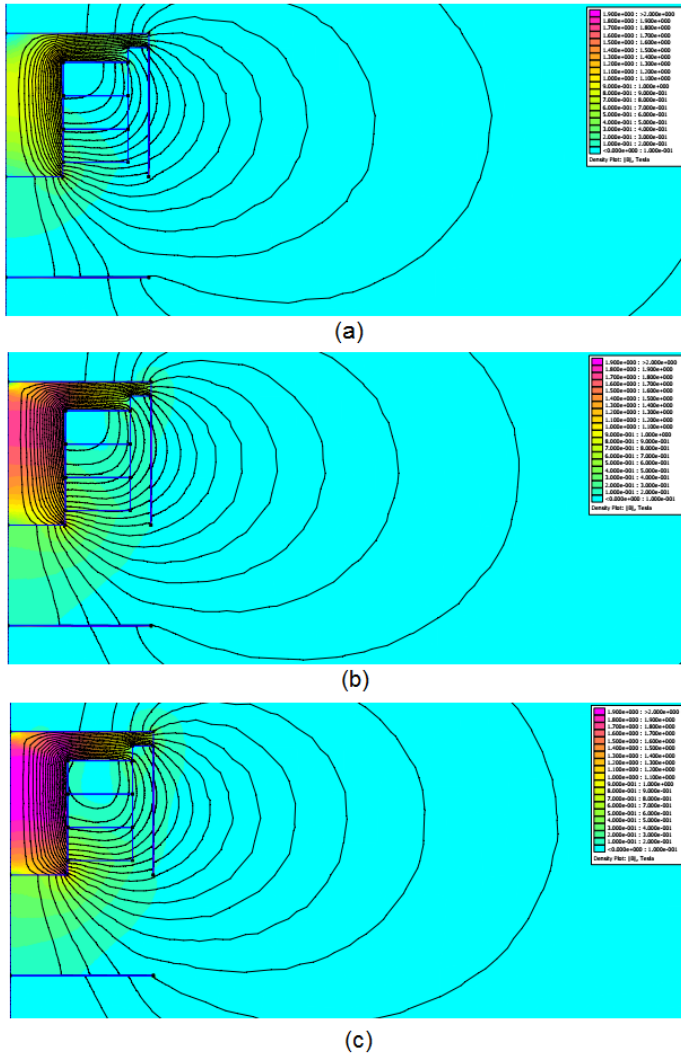
Rezultati su predstavljeni u vidu zavisnosti amplitude vektora magnetske indukcije od koordinata r i $-z$ cilindričnog koordinatnog sistema koji je prikazan na Slici 10, i u vidu amplitude vektora elektromagnetne sile koja deluje na čelični cilindar u funkciji njegove udaljenosti d .

Na Slikama 11(a), (b), (c) su prikazane raspodele magnetnog polja za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A) i za udaljenost čeličnog cilindra od $d = 0,7$ m.

Na Slikama 12 (a), (b), (c) su prikazane zavisnosti amplitude magnetske indukcije od koordinate r , za pet različitih vrednosti koordinate z ($z=-0,14$ m, $-0,28$ m, $-0,42$ m, $-0,56$ m, $-0,7$ m), za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A) i za udaljenost čeličnog cilindra od $d=0,7$ m.

Na osnovu dobijenih rezultata prikazanih na Slici 12(a) se zaključuje da je za koordinate od interesa za praktičnu realizaciju $r=0$ m i $z=-0,7$ m i za jačinu struje elektromagneta $I_1=50$ A, amplituda vektora indukcije $B_1=75$ mT. Za iste vrednosti koordinate i za jačinu struje $I_2=100$ A, sa Slike 12(b) se dobija da je amplituda vektora indukcije $B_2=135$ mT, dok se za slučaj

kada je struja elektromagneta jednaka $I_3=150$ A, dobija da je amplituda vektora indukcije $B_3=165$ mT, kao što pokazuje Slika 12(c).



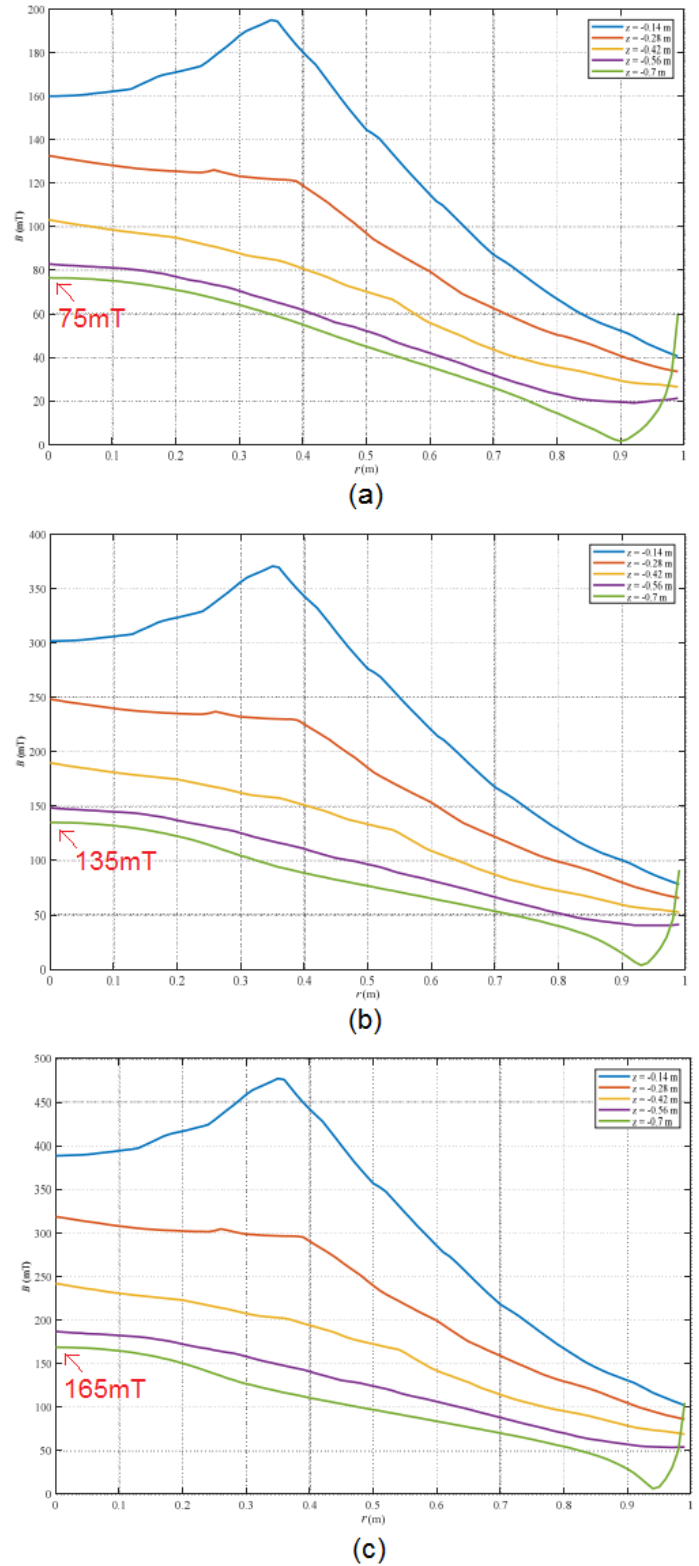
Slika 11. Raspodela magnetnog polja za slučaj elektromagneta sa teretom-čeličnim cilindrom na udaljenosti 0,7 m i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

Zapaža se da u slučaju kada je opterećenje magneta čelični cilindar na udaljenosti $d=0,7$ m, vrednosti magnetne indukcije za koordinate $r=0$, $z=-0,7$ m, veće za oko 50% u odnosu na prethodni slučaj kada je elektromagnet bio usamljen, odnosno bez tereta.

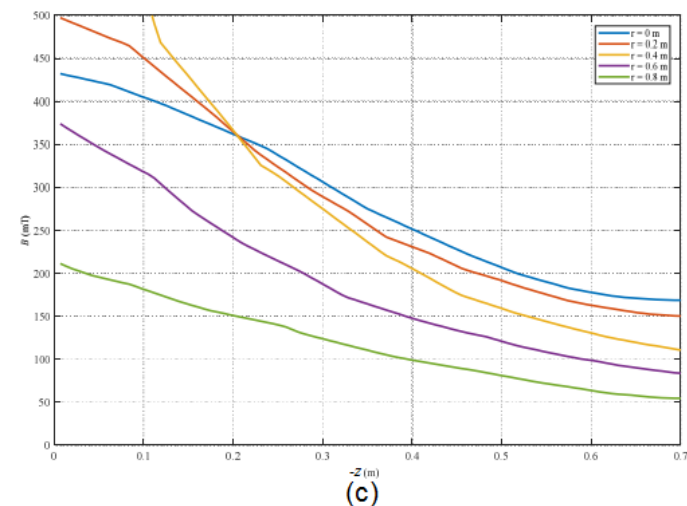
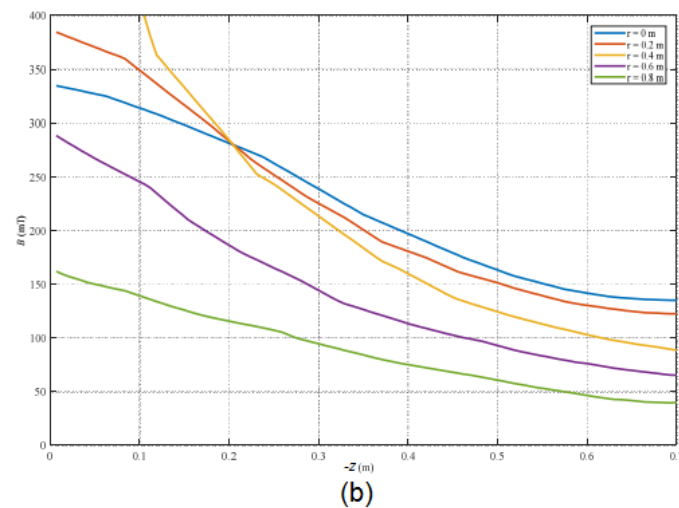
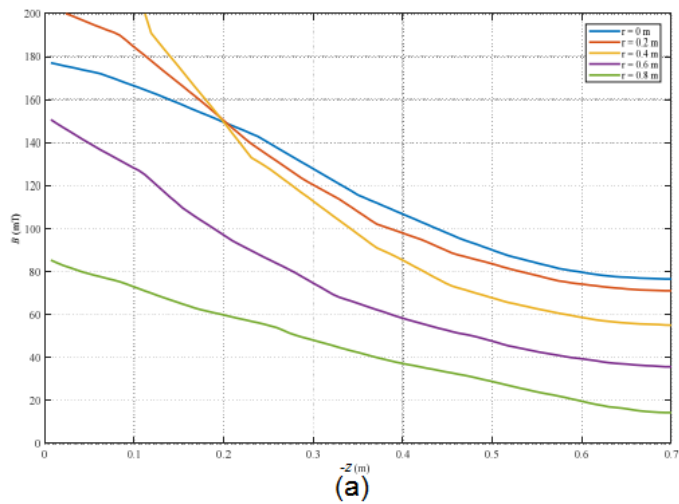
Interesantno je da amplituda vektora indukcije ima maksimalne vrednosti 195 mT, 375 mT, 475 mT u svim navedenim slučajevima 50 A, 100 A, 150 A, respektivno za vrednost koordinata $z=-0,14$ m i $r=0,35$ m, ali treba opet napomenuti da ove vrednosti nisu od interesa pošto su dimenzije transportne trake i ugradne mere na realnom sistemu diktirajući faktor.

Na Slikama 13(a), (b), (c) su prikazane zavisnosti amplitude magnetne indukcije od koordinate $-z$, za pet različitih vrednosti koordinate r ($r=0, 0,2$ m, $0,4$ m, $0,6$ m, $0,8$ m), za tri različite vrednosti struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A) i za

udaljenost čeličnog cilindra $d = 0,7$ m.



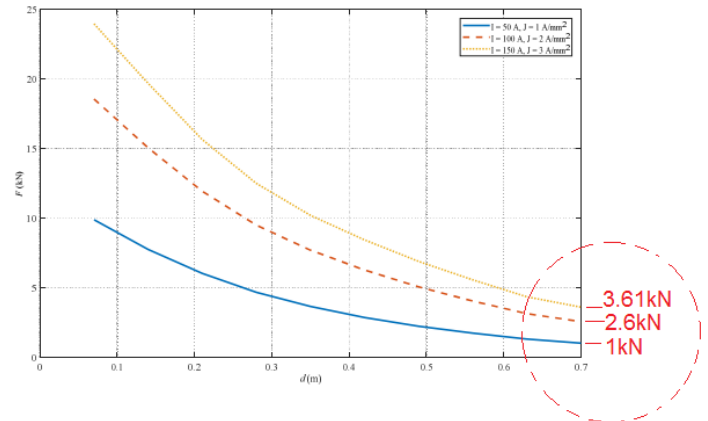
Slika 12. Raspodele amplitude vektora magnetne indukcije za slučaj elektromagneta sa teretom-čeličnim cilindrom na udaljenosti 0,7 m u funkciji koordinate r , za pet različitih vrednosti koordinate $-z$ i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A



Slika 13. Raspodjele amplituda vektora magnetne indukcije magnetnog polja za slučaj elektromagneta sa teretom- čeličnim cilindrom na udaljenosti $d=0,7$ m u funkciji koordinate $-z$, za pet različitih vrednosti koordinate r i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

Na Slici 14 je prikazana amplituda vektora elektromagnetske sile koja deluje na čelični cilindar u funkciji udaljenosti d čeličnog

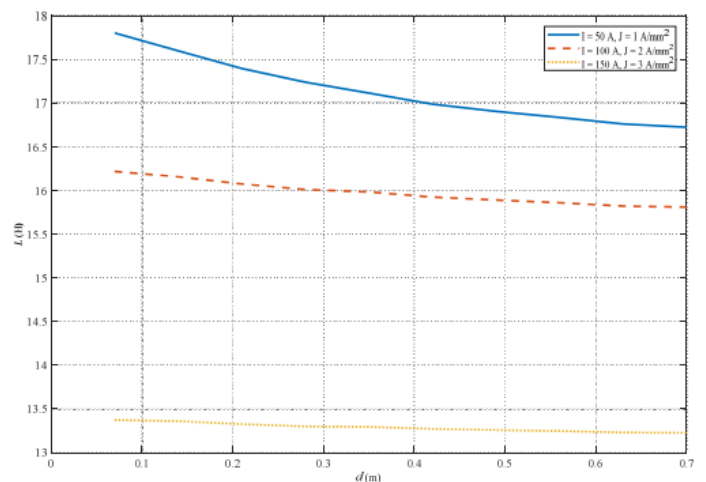
cilindra u odnosu na elektromagnet za tri različite vrednosti struje elektromagneta (50A, 100A, 150A).



Slika 14. Amplituda vektora elektromagnetske sile koja deluje na čelični cilindar u funkciji udaljenosti čeličnog cilindra u odnosu na elektromagnet i jačine struje elektromagneta

Sa Slike 14 se uočava da se najveća privlačna sila na rastojanju $d=0,7$ m (što je od interesa za praksu) vrednosti 3,61 kN ima u slučaju pobudne struje elektromagneta od 150 A, dok je za slučaj pobudne struje elektromagneta od 50 A ova sila skoro 3,5 puta manja, odnosno da je njena vrednost jednaka oko 1 kN. Za pobudnu struju elektromagneta od 100A privlačna sila je 2,6 kN.

Na Slici 15 je prikazana induktivnost namotaja elektromagneta u funkciji udaljenosti d čeličnog cilindra u odnosu na elektromagnet za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A).

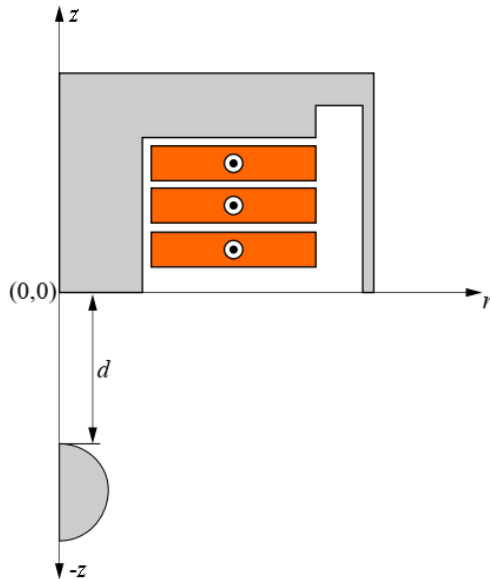


Slika 15. Induktivnost namotaja elektromagneta u funkciji udaljenosti d čeličnog cilindra u odnosu na elektromagnet i jačine struje elektromagneta

Na osnovu dobijenih rezultata koji su prikazani na Slici 15 se može zaključiti da se za rastojanje $d=0,7$ m od interesa, maksimalna induktivnost elektromagneta od 16,8 H ima pri struji od 50 A, dok je ova vrednost minimalna 13,25 H, pri struji od 150 A. Pri struji od 100 A ova induktivnost je 15,8 H.

V ANALIZA ELEKTROMAGNETA SEPARATORA SA TERETOM U OBLIKU ČELIČNE KUGLE

U ovom poglavlju su dati rezultati analize magnetskog polja elektromagneta sa opterećenjem u obliku čelične kugle prečnika 140 mm (masa 10 kg) na udaljenosti d koja se menja od 0 m do 0,7 m u odnosu na centralni deo elektromagneta (početak koordinatnog sistema je dat na Slici 16). Ovaj analizirani slučaj je veoma bitan za praksu. Rezultati su predstavljeni u vidu zavisnosti amplitude vektora magnetne indukcije od koordinata r i $-z$ cilindričnog koordinatnog sistema koji je prikazan na Slici 16, kao i u vidu amplitude vektora elektromagnetske sile koja deluje na čeličnu kuglu u funkciji njene udaljenosti d .



Slika 16. Cilindrični koordinatni sistem vezan za elektromagnet i čeličnu kuglu na udaljenosti d

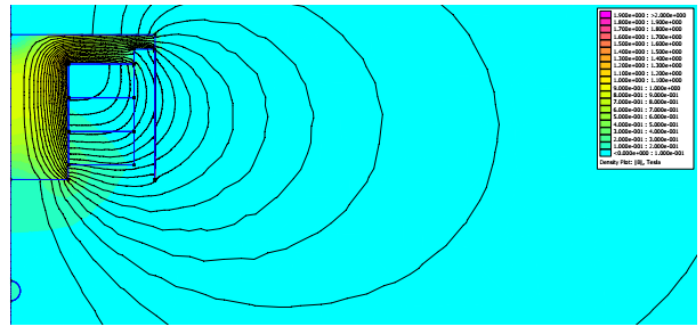
Na Slikama 17(a), (b), (c) su prikazane raspodele magnetnog polja za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50A, 100A, 150A) i za udaljenost čelične kugle od $d = 0,7$ m.

Na Slikama 18 (a), (b), (c) su prikazane zavisnosti amplitude magnetske indukcije od koordinate r , za pet različitih vrednosti koordinate $-z$ ($z = -0,14$ m, $-0,28$ m, $-0,42$ m, $-0,56$ m, $-0,7$ m), za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50A, 100A, 150A) i za udaljenost čelične kugle od $d = 0,7$ m.

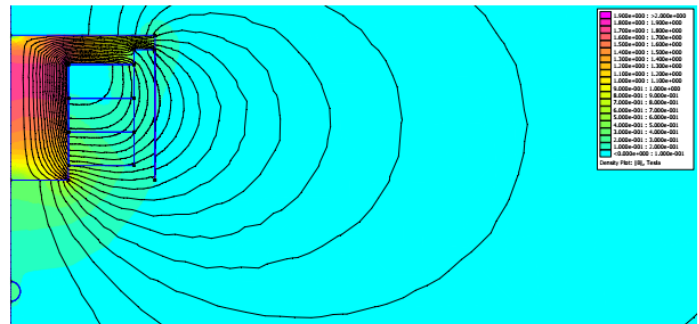
Na osnovu dobijenih rezultata prikazanih na Slici 18(a) se zaključuje da je za koordinate od interesa za praktičnu realizaciju $r=0$ m i $z=-0,7$ m i za jačinu struje elektromagneta $I_1=50$ A, amplituda vektora indukcije u ovom slučaju $B_1=132$ mT. Za iste vrednosti koordinata i za jačinu struje $I_2=100$ A, sa Slike 18(b) se dobija da je amplituda vektora indukcije $B_2=250$ mT, dok se za slučaj kada je struja elektromagneta jednaka $I_3=150$ A, dobija da je amplituda vektora indukcije $B_3=315$ mT, kao što pokazuje Slika 18(c).

Maksimalne vrednosti indukcije od 190 mT, 360 mT i 470 mT, za sva tri slučaja strujnog opterećenja elektromagneta 50 A, 100 A, 150 A, respektivno, se imaju za vrednosti koordinate $z=-0,14$ m i $r=0,35$ m, ali treba napomenuti da kao i u prethodnim slučajevima, ove vrednosti nisu od praktičnog

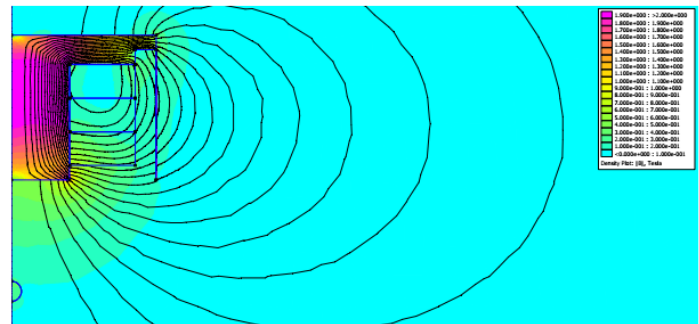
značaja.



(a)



(b)



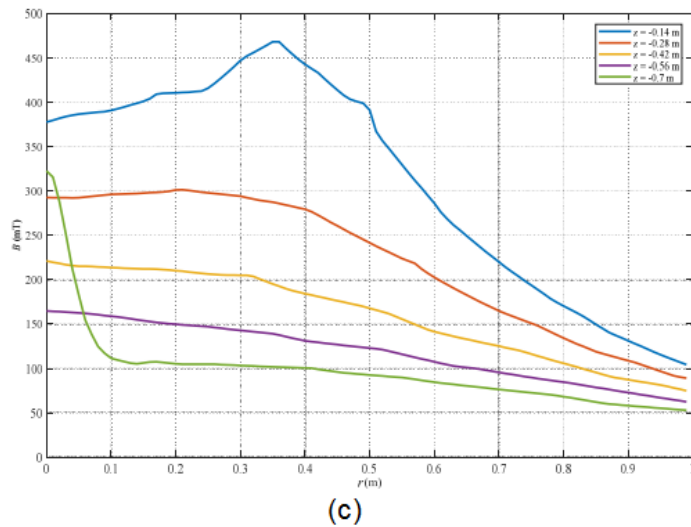
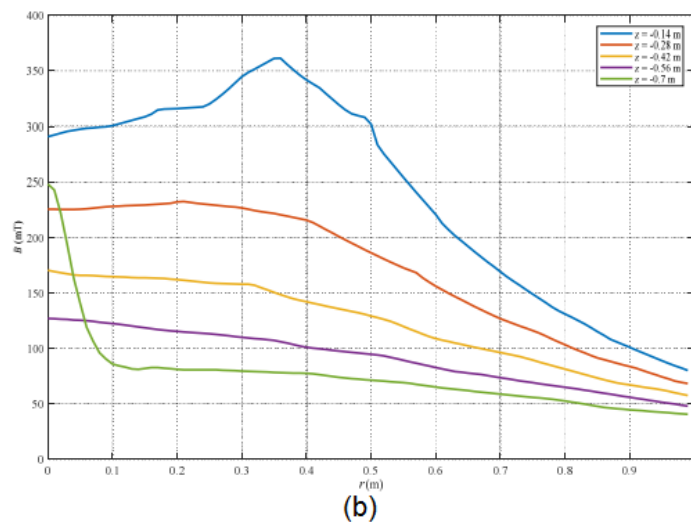
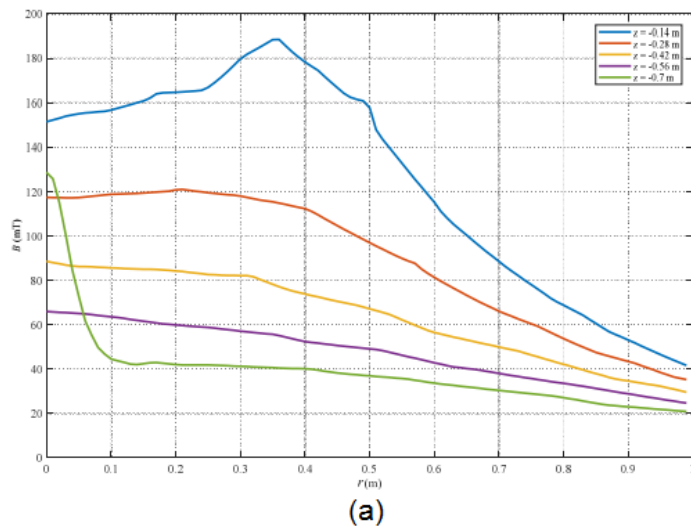
(c)

Slika 17. Raspodela magnetnog polja za slučaj elektromagneta sa teretom-čeličnom kuglom na udaljenosti 0,7 m i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

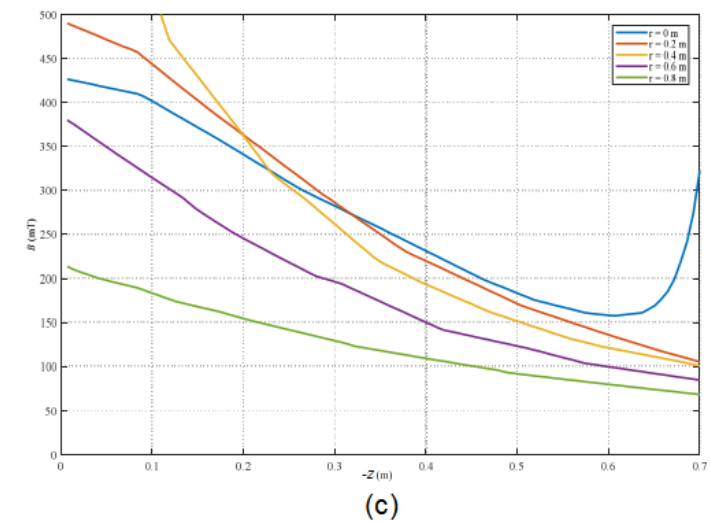
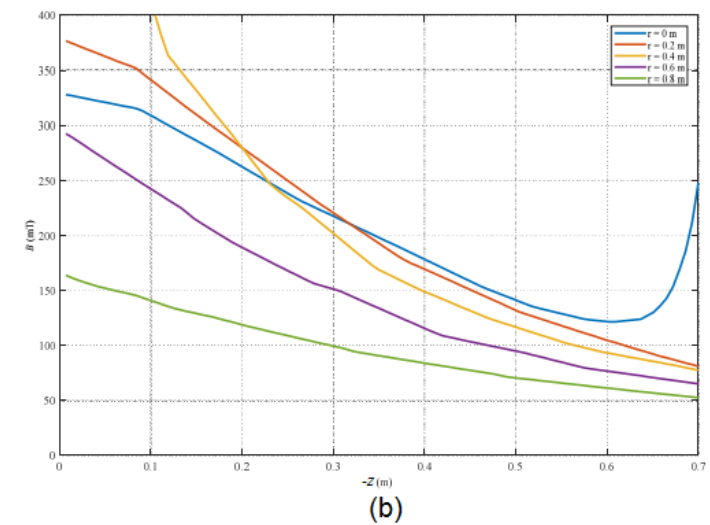
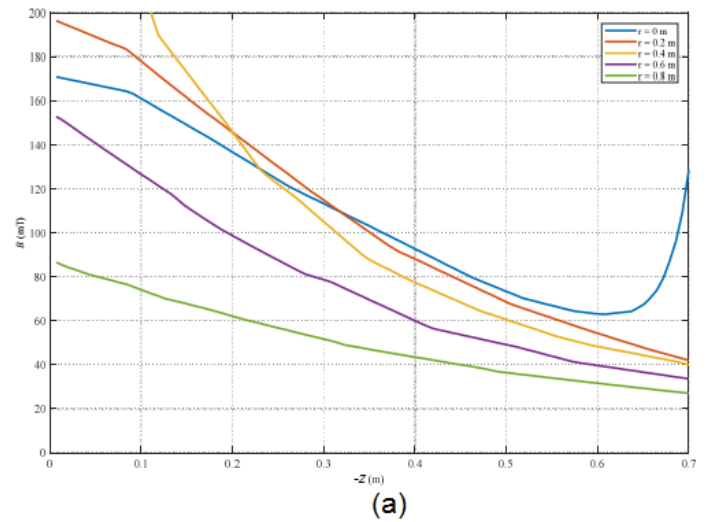
Treba napomenuti da se u ovom slučaju ima značajan pad magnetne indukcije za rastojanja r koja su veća od prečnika metalne kugle (odnosno $r > 140$ mm). U opsegu rastojanja $0,4 \text{ m} \geq r \geq 0,14$ m, vrednosti magnetne indukcije za struju od $I_1=50$ A iznose oko 40 mT, za struju od $I_2=100$ A vrednosti magnetne indukcije su oko 70 mT, dok su za struju $I_3=150$ A vrednosti magnetne indukcije oko 100 mT. Za rastojanja $r > 0,4$ m, vrednosti magnetne indukcije opadaju postepeno do $r=1$ m na minimalne vrednosti: u prvom slučaju za struju od 50 A na minimalnu vrednost magnetne indukcije od 20 mT, za struju od 100 A na vrednost od 35 mT i za struju od 150 A na minimalnu vrednost od 50 mT.

Na Slikama 19(a), (b), (c) su prikazane zavisnosti amplitude magnetske indukcije od koordinate $-z$, za pet različitih vrednosti koordinate r ($r = 0, 0,2$ m, $0,4$ m, $0,6$ m, $0,8$ m), za tri različite vrednosti jačine struje elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A) i za

udaljenost čelične kugle od $d=0,7$ m.



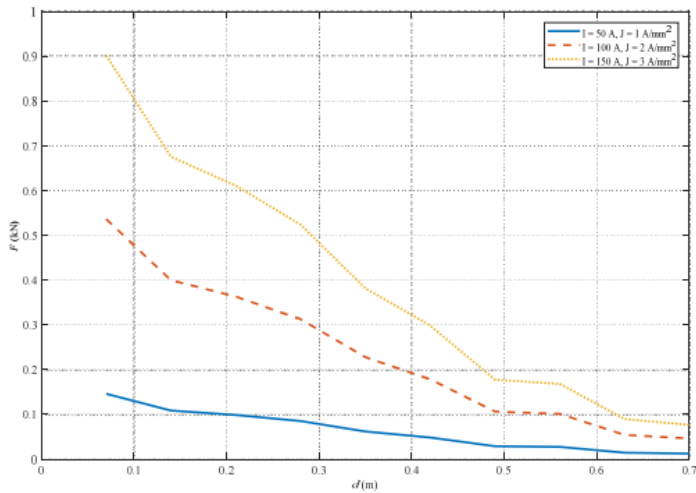
Slika 18. Raspodela amplituda vektora magnetne indukcije za slučaj elektromagneta sa teretom - čelična kugla na udaljenosti 0,7 m u funkciji koordinate r , za pet različitih vrednosti koordinate $-z$ i za tri različite struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A



Slika 19. Raspodela amplituda vektora magnetne indukcije magnetnog polja za slučaj elektromagneta sa teretom - čeličnom kuglom na udaljenosti $d=0,7$ m u funkciji koordinate $-z$, za pet različitih vrednosti koordinate r i za tri različite vrednosti struje; (a) $I_1=50$ A, (b) $I_2=100$ A, (c) $I_3=150$ A

Na Slici 20 je prikazana amplituda vektora elektromagnetne sile

koja deluje na čeličnu kuglu u funkciji udaljenosti d čelične kugle u odnosu na elektromagnet za tri različite vrednosti struje elektromagneta (50 A, 100 A i 150 A).



Slika 20. Amplituda vektora elektromagnetne sile koja deluje na čeličnu kuglu u funkciji udaljenosti čelične kugle od elektromagneta i jačine njegove struje

Sa dijagrama na Slici 20 se uočava da se maksimalna sila elektromagneta koja deluje na metalnu kuglu na rastojanju 0,7 m ima pri struji od 150 A i da je njena vrednost približno jednaka 80 N. Za struju elektromagneta od 100 A ova sila ima vrednost od oko 47 N, dok se njena najmanja vrednost od 12 N ima pri struji elektromagneta od 50 A.

U Tabeli 2 je data zavisnost induktivnosti namotaja elektromagneta od jačine struje elektromagneta za slučaj kada se u blizini elektromagneta nalazi čelična kugla prečnika 140 mm. Udaljenost čelične kugle u odnosu na elektromagnet nema značajnijeg uticaja na vrednost induktivnosti namotaja elektromagneta. Induktivnost namotaja u ovom slučaju je gotovo ista kao za slučaj analiziran u poglavlju III, odnosno za slučaj elektromagneta bez tereta.

Tabela 2. Zavisnost induktivnosti elektromagneta od jačine struje (EM sa teretom-čelična kugla prečnika 140 mm)

Struja (A)	50	100	150
Induktivnost (H)	16.52	15.70	13.18

VIII ZAKLJUČAK

U radu je izvršena analiza raspodele magnetne indukcije i privlačne sile elektromagneta koji je dimenzionisan za potrebe u jednom tipičnom sistemu za elektromagnetnu separaciju metalnih delova iz uglja na transportnoj traci za dopremu uglja. Analizirani su slučajevi za tri karakteristične struje namotaja elektromagneta (50 A, 100 A, 150 A) i za slučajeve kada je elektromagnet usamljen (odnosno bez tereta) i kada je elektromagnet sa teretom (čelični cilindar na rastojanju od 0,7 m i čelična kugla prečnika 140 m, takođe na rastojanju od 0,7 m). Na osnovu FEM analize za različita rastojanja određene su

vrednosti magnetne indukcije i selektovani su slučajevi koji se ukapaju u osnovni polazni tehnički zahtev za projektovanje elektromagneta separatora, da se na rastojanju 0,7 m od magneta imaju vrednosti magnetne indukcije od minimalno 80 mT. FEM simulacije i sprovedena analiza su bili od značaja za projektovanje i realizaciju realnog elektromagneta u sklopu sistema za elektromagnetnu separaciju metalnih delova iz uglja na transportnim trakama na dopremi uglja sa površinskog kopa „Drmno“ na blokove TE „Kostolac“.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je delom podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, Republike Srbije kroz u krovni projekat pod Ugovorom br. 451-03-47/2023-01/200103.

LITERATURA/REFERENCES

- Andres, U. *Magneto-hydrodynamic and Magneto-hydrostatic Methods of Mineral Separation*, John Wiley and Sons, New York and Israel University Press, Jerusalem 1976.
- Svoboda, J. *Magnetic Techniques for the Treatment of Materials*, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Morgan, D.G. *Magnetic separators for protection of process equipment*, Powder Bulk Engineering, Vol. 2, No. 7, 1988.
- Morgan, D.G, Bronkala, W.J. The selection and application of magnetic separation equipment. Part I. *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 3, No. 5, 1991. <https://doi.org/10.1155/1991/26791>
- Andres, U., O'Reilly, W. Selectivity in the magnetic separation of minerals. *Powder Technology*, Vol. 79, No. 2, pp. 147-158, 1994. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(94\)02813-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(94)02813-3)
- Industrial Electromagnetic Separators, www.imt-inc.com [pristupljeno 09.06.2023]
- Suspended Magnets-Remove Tramp Metals form Conveyed Material, www.eriez.com [pristupljeno 09.06.2023]
- Suspended Magnets-ERIEZ, <https://www.eriez.fr/Documents/Literature/Brochures/Products/Magnetic-Separation/SB-320-UK-Eriez-Europe-Suspended-Electromagnet.pdf> [pristupljeno 09.06.2023]
- Birss, R.R., Parker, M.R., Wong, M.K. Modeling of fields in magnetic drum separators. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 15, No. 5, pp. 1305-1309, 1979. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1979.1060326>
- Schimpf, P.H. A Detailed Explanation of Solenoid Force, *International Journal on Recent Trends in Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 2, 2013. https://ia800307.us.archive.org/15/items/idescitation_gmail_25_201403/25.pdf [pristupljeno 09.06.2023]
- Qawaqzeh, M.Z. Design and computation of a suspended magnetic separator for processing metallurgic slag, *Przeglad Elektrotechniczny*, R. 96 NR 4/2020. <https://doi.org/10.15199/48.2020.04.13>
- Meeker, D. *Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM Version 1.2 User's Manual*, 2006.
- Meeker, D. *Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual*, 2009.

AUTORI/AUTHORS

dr Željko V. Despotović, Univerzitet u Beogradu, Institut "Mihajlo Pupin", zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
msr Đorđe M. Lekić, Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, djordje.lekic@etf.unibl.org, ORCID [0000-0003-2543-1424](https://orcid.org/0000-0003-2543-1424)