



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Aleksandar Poznić

**Povećanje ukupnog kočnog momenta
magnetoreološke disk kočnice primenom
kombinovanog režima rada**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2017. godina.



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR:	
Identifikacioni broj, IBR:	
Tip dokumentacije, TD:	Monografska dokumentacija
Tip zapisa, TZ:	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada, VR:	Doktorska disertacija
Autor, AU:	Aleksandar Poznić
Mentor, MN:	dr Danijela Miloradović, docent
Naslov rada, NR:	Povećanje ukupnog kočnog momenta magnetoreološke disk kočnice primenom kombinovanog režima rada
Jezik publikacije, JP:	Srpski
Jezik izvoda, JI:	srp. / eng.
Zemlja publikovanja, ZP:	Republika Srbija
Uže geografsko područje, UGP:	Autonomna pokrajina Vojvodina
Godina, GO:	2017.
Izdavač, IZ:	autorski reprint
Mesto i adresa, MA	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Fizički opis rada, FO: (poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)	(10 / 185 / 147 / 21 / 58 / 90 / 4)
Naučna oblast, NO:	Mehatronika
Naučna disciplina, ND:	Mehatronika u mehanizaciji; Motorna vozila
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO:	Magnetoreološka disk kočnica, magnetska svojstva materijala, magnetsko polje, ukupni kočni momenat, konstrukcija
UDK	
Čuva se, ČU:	Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka
Važna napomena, VN:	
Izvod, IZ:	U doktorskoj disertaciji razmatra se unapređenje konstrukcije magnetoreološke disk kočnice sa ciljem povećanja vrednosti ukupnog kočnog momenta. Radi potpunog razumevanja međusobnog odnosa materijala i magnetskog polja na prvom mestu je izvršeno utvrđivanje magnetskih svojstava materijala. Unapređenje konstrukcije je izvršeno kroz više iteracija i prototipova. Merenje vrednosti ukupnog kočnog momenta je podeljeno na merenje više njegovih komponenti pri različitim vrednostima broja obrtaja i upravljačke struje namotaja.
Datum prihvatanja teme, DP:	
Datum odbrane, DO:	



UNIVERZITET U NOVOM SADU • FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Članovi komisije, KO:	Predsednik:	dr Branislav Borovac, redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.	
	Član:	dr Anamarija Juhas, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.	
	Član:	dr Dragan Taranović, docent, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.	
	Član,	dr Boris Stojić, docent, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.	Potpis mentora
	Član, mentor:	dr Danijela Miloradović, docent, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.	

Obrazac Q2.HA.06-05-Izdanje 1



KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Aleksandar Poznić
Mentor, MN :	Danijela Miloradović PhD, assist. professor
Title, TI :	Magnetorheological disk brake overall braking torque increase using combined operating mode
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	English / Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2017.
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	6 Dositej Obradovic square, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	(10 / 185 / 147 / 21 / 58 / 90 / 4)
Scientific field, SF :	Mechatronics
Scientific discipline, SD :	Mechatronics in mechanization; Motor vehicles
Subject/Key words, S/KW :	Magnetorheological disk brake, material's magnetic properties, magnetic field, overall braking torque, construction
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Science
Note, N :	
Abstract, AB :	In this thesis magnetorheological disk brake construction improvement is considered, with the goal to increase the overall braking torque value. For purposes of better understanding of material to magnetic field relationship, series of magnetic field testing were conducted. Construction improvement has been carried out through several iterations and different prototypes. Overall braking torque value measurements have been divided into several component measurements, utilizing different rotational speeds and coil control currents.
Accepted by the Scientific Board on,	
Defended on, DE :	



UNIVERZITET U NOVOM SADU • **FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Defended Board, DB:	President:	Prof. Branislav Borovac, Ph. D., full-time prof., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.	Menthor's sign
	Member:	Prof. Anamarija Juhas, Ph. D., associate prof. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.	
	Member:	Prof. Dragan Taranović, Ph. D., assistant prof., Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.	
	Member,	Prof. Boris Stojić, Ph. D., assistant prof., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad	
	Member, Mentor:	Prof. Danijela Miloradović, Ph. D., assistant prof., Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac.	

Obrazac Q2.NA.06-05-Izdanje 1

Sadržaj

<i>Spisak prikazanih slika</i>	<i>i</i>
<i>Spisak korišćenih tabela</i>	<i>v</i>
<i>Spisak korišćenih oznaka i veličina</i>	<i>vi</i>
<i>Spisak akronima</i>	<i>vii</i>
<i>Zahvalnica</i>	<i>x</i>
<i>1. Uvodna razmatranja</i>	<i>1</i>
<i>1.1. Cilj istraživanja</i>	<i>2</i>
<i>1.2. Struktura rada</i>	<i>2</i>
<i>1.3. Stanje istraživanja u oblasti magnetoreoloških kočnica u svetu</i>	<i>3</i>
<i>1.4. Polazne hipoteze i metode istraživanja</i>	<i>7</i>
<i>2. Pametni materijali</i>	<i>9</i>
<i>2.1. Elektoreološke tečnosti</i>	<i>9</i>
<i>2.2. Ferrofluidi</i>	<i>11</i>
<i>2.3. Magnetoreološke tečnosti</i>	<i>12</i>
<i>2.3.1. Svojstva i sastav magnetoreološke tečnosti</i>	<i>12</i>
<i>2.3.2. Matematički modeli ponašanja magnetoreoloških tečnosti</i>	<i>14</i>
<i>2.3.3. Režimi rada</i>	<i>19</i>
<i>2.3.4. Primena</i>	<i>21</i>
<i>3. Projektovanje magnetskog kola</i>	<i>26</i>
<i>3.1. O magnetizmu</i>	<i>26</i>
<i>3.1.1. Magnetski materijali</i>	<i>26</i>
<i>3.1.2. Amperov zakon</i>	<i>27</i>
<i>3.1.3. Veza magnetskog polja i magnetske indukcije</i>	<i>28</i>
<i>3.1.4. Magnetska permeabilnost feromagnetskih materijala</i>	<i>30</i>
<i>3.1.5. Magnetski fluks i Gausov zakon</i>	<i>31</i>
<i>3.2. Projektovanje magnetskog kola</i>	<i>31</i>
<i>3.2.1. Magnetsko kolo</i>	<i>31</i>
<i>3.2.2. Magnetsko kolo sa procepom ispunjenim magnetoreološkom tečnošću</i>	<i>33</i>
<i>3.2.3. Rasipanje magnetskog polja</i>	<i>35</i>
<i>3.3. Određivanje magnetskih svojstava feromagnetskih materijala</i>	<i>36</i>
<i>3.3.1. Snimanje histerezisne petlje</i>	<i>37</i>
<i>3.3.2. Kriva prvobitnog magnetisanja</i>	<i>39</i>
<i>3.4. Analiza magnetskog kola metodom konačnih elemenata</i>	<i>41</i>
<i>4. Konstrukcija i svojstva magnetoreoloških kočnica</i>	<i>42</i>
<i>4.1. Podela magnetoreoloških kočnica prema obliku konstrukcije</i>	<i>42</i>

4.1.1. Magnetoreološke kočnice tipa doboš i obrnuti doboš.....	44
4.1.2. Magnetoreološka kočnica tipa T-rotor	46
4.1.3. Magnetoreološka kočnica tipa disk i multidisk.....	47
4.2. Merenje ukupnog kočnog momenta magnetoreološke kočnice	49
4.2.1. Metodi merenja kočnog momenta magnetoreološke kočnice.....	50
4.2.2. Merenje reaktivnog kočnog momenta	53
4.3. Preliminarni prototipovi magnetoreološke kočnice	55
4.3.1. Prvi preliminarni prototip magnetoreološke kočnice	57
4.3.2. Drugi preliminarni prototip magnetoreološke kočnice.....	61
5. Raspodela magnetskog polja i predlog kombinovanja radnih režima magnetoreološke tečnosti	65
5.1. Raspodela magnetskog polja.....	65
5.2. Predlog kombinovanja radnih režima magnetoreološke tečnosti	67
6. Eksperimentalni sistem.....	69
6.1. Konstrukcija prototipova.....	70
6.1.1. Ispitni sto i merenje ukupnog kočnog momenta	74
6.2. Merna instalacija za merenje magnetskih svojstava predloženih vrsta čelika	76
7. Rezultati i diskusija	77
7.1. Rezultati merenja magnetskih svojstava predloženih vrsta čelika	77
7.1.1. Familija histerezisnih krivih.....	77
7.1.2. Kriva prvobitnog magnetisanja.....	79
7.2. Rezultati merenja ukupnog kočnog momenta.....	84
7.2.1. Prvi preliminarni prototip.....	84
7.2.2. Drugi preliminarni prototip	87
7.2.3. Prototip 1.....	89
7.2.4. Prototip 2.....	91
7.3. Modelovanje prototipova 1 i 2 metodom konačnih elemenata.....	92
8. Zaključna razmatranja i pravci budućih istraživanja	104
9. Literatura	106
10. Prilozi.....	115
10.1. Tehnička dokumentacija drugog preliminarnog prototipa	115
10.2. Tehnička dokumentacija prototipa 1 i prototipa 2.....	134
10.3. Formiranje modela u Comsol-u	155
10.4. Numeričke vrednosti rezultata pojedinih merenja	159

Spisak prikazanih slika

<i>Slika 2.1. Prikaz uzorka komercijalne elektoreološke tečnosti.....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.2. Gradijent brzine između dve ploče.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 2.3. Šematski prikaz nenamagnetisanog feromagnetskog materijala</i>	<i>13</i>
<i>Slika 2.4. Formiranje lančastih struktura unutar magnetoreološke tečnosti.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 2.5. Tangencijalni napon u funkciji od gradijenta brzine za dilatantnu tečnost.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.6. Tangencijalni napon u funkciji od gradijenta brzine za pseudoplastičnu tečnost.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.7. Tangencijalni napon u funkciji gradijenta brzine</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.8. Bingamov model.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.9. Gamota-Filisko model.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.10. Buc-Venov model.....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.11. Spenserov model.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2.12. Režimi rada magnetoreoloških tečnosti</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2.13. Prikaz nekoliko tipova prigušivača oscilacija</i>	<i>21</i>
<i>Slika 2.14. Principi poliranja magnetoreološkom tečnošću</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.15. Uređaj za poliranje pomoću magnetoreološke tečnosti.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.16. Šematski prikaz hidrauličnog sistema sa magnetoreološkim ventilima.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2.17. Komercijalna primena magnetoreološke kočnice</i>	<i>24</i>
<i>Slika 2.18. Ilustracija karakteristične konstrukcije magnetoreološke kočnice</i>	<i>25</i>
<i>Slika 3.1. Magnetski uređaj korišćen u drevnoj Kini za orijentaciju u prostoru</i>	<i>26</i>
<i>Slika 3.2. Magnetsko polje u okolini provodnika</i>	<i>27</i>
<i>Slika 3.3. Ilustracija H – B krive feromagnetskog materijala</i>	<i>29</i>
<i>Slika 3.4. Jednostavno magnetsko kolo.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 3.5. Jednostavno magnetsko kolo sa procepom ispunjenim magnetoreološkom tečnošću</i>	<i>33</i>
<i>Slika 3.6. Uticaj promene veličine procepa sa magnetoreološkom tečnošću na kočni moment i jačinu magnetskog polja.....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 3.7. Magnetski fluks u jezgri sa procepom</i>	<i>35</i>

<i>Slika 3.8. Šema uređaja za snimanje dinamičke histerezisne krive</i>	<i>37</i>
<i>Slika 3.9. Familija histerezisnih petlji, spajanje vrhova</i>	<i>38</i>
<i>Slika 3.10. Šema uređaja za snimanje krive prvobitnog magnetisanja balističkom metodom.....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 3.11. Konstrukcija krive prvobitnog magnetisanja</i>	<i>40</i>
<i>Slika 3.12. Šema električnog kola za određivanje vrednosti balističke konstante</i>	<i>40</i>
<i>Slika 4.1. Ilustrovani primeri tipova magnetoreoloških kočnica</i>	<i>43</i>
<i>Slika 4.2. Ilustracija preseka modela magnetoreološke kočnice</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.3. Ilustracija preseka modela magnetoreološke kočnice</i>	<i>46</i>
<i>Slika 4.4. Ilustracija preseka modela magnetoreološke kočnice</i>	<i>47</i>
<i>Slika 4.5. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika magnetoreoloških kočnica</i>	<i>51</i>
<i>Slika 4.6. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika magnetoreoloških kočnica, ...</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.7. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika magnetoreoloških kočnica, ...</i>	<i>52</i>
<i>Slika 4.8. Merenje reaktivnog kočnog momenta magnetoreološke kočnice.....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 4.9. Linijska postavka laboratorijskog uređaja za merenje reaktivnog kočnog momenta.....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 4.10. Statorski sklop prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke disk kočnice.....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 4.11. Rotorski sklop prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke disk kočnice.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 4.12. Prvi preliminarni prototip magnetoreološke disk kočnice.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 4.13. Međusobni odnos elemenata prvog preliminarnog prototipa.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 4.14. Laboratorijski uređaj za ispitivanje kočnih svojstava prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice</i>	<i>60</i>
<i>Slika 4.15. Elementi drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 4.16. Elementi statorskog sklopa drugog preliminarnog prototipa</i>	<i>62</i>
<i>Slika 4.17. Elementi rotorskog sklopa drugog preliminarnog prototipa</i>	<i>64</i>
<i>Slika 4.18. Rotorski sklopovi drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 4.19. Laboratorijski uređaj za ispitivanje kočnih svojstava drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice</i>	<i>64</i>
<i>Slika 5.1. Ilustracija preseka modela klasične magnetoreološke disk kočnice i raspodele magnetske indukcije</i>	<i>66</i>
<i>Slika 5.2. Ilustracija raspodele magnetske indukcije kroz konstrukciju magnetoreološke disk kočnice sa dodatnim paramagnetskim elementima</i>	<i>67</i>

<i>Slika 5.3. Radni režim uštinuća.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 6.1. Elementi statorskog sklopa.....</i>	<i>70</i>
<i>Slika 6.2. Elementi rotorskog sklopa prototipa 1 i prototipa 2.....</i>	<i>71</i>
<i>Slika 6.3. Namotaji prototipa magnetoreološke kočnice.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 6.4. Izgled oštećene aluminijumske čaure.....</i>	<i>73</i>
<i>Slika 6.5. Postavka ispitnog stola prototipova 1 i 2.....</i>	<i>75</i>
<i>Slika 6.6. Postavka merne instalacije za snimanje dinamičke histerezisne krive</i>	<i>76</i>
<i>Slika 7.1. Familija histerezisnih krivih.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 7.2. Rezultati određivanja normalne krive magnetisanja za C15E.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 7.3. Rezultati određivanja normalne krive magnetisanja za 11SMn30.....</i>	<i>78</i>
<i>Slika 7.4. Odnos struje primara i balističkog otklona uzoraka C15E.....</i>	<i>79</i>
<i>Slika 7.5. Odnos struje primara i balističkog otklona uzoraka 11SMn30</i>	<i>80</i>
<i>Slika 7.6. Kriva prvobitnog magnetisanja uzoraka C15E.....</i>	<i>81</i>
<i>Slika 7.7. Kriva prvobitnog magnetisanja uzoraka 11SMn30</i>	<i>82</i>
<i>Slika 7.8. Promena vrednosti komponenti UKM prvog preliminarnog prototipa</i>	<i>86</i>
<i>Slika 7.9. Promena vrednosti komponenti UKM drugog preliminarnog prototipa</i>	<i>88</i>
<i>Slika 7.10. Promena vrednosti komponenti UKM prototipa 1</i>	<i>90</i>
<i>Slika 7.11. Promena vrednosti komponenti UKM prototipa 2.....</i>	<i>91</i>
<i>Slika 7.12. Kombinovana ilustracija preseka prototipova 1 i 2 sa prikazom karakterističnih linija.....</i>	<i>92</i>
<i>Slika 7.13. Rezultati simulacije promene vrednosti magnetske indukcije i magnetskog polja</i>	<i>93</i>
<i>Slika 7.14. Kriva prvobitnog magnetisanja Basonetic 5030,.....</i>	<i>94</i>
<i>Slika 7.15. Promene magnetskog polja prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu r.....</i>	<i>96</i>
<i>Slika 7.16. Promene magnetskog polja prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu z.....</i>	<i>98</i>
<i>Slika 7.17. Promene magnetske indukcije prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu r</i>	<i>100</i>
<i>Slika 7.18. Promene magnetske indukcije prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu z</i>	<i>102</i>
<i>Slika 7.19. Poređenje rezultata numeričke simulacije sa izmerenim vrednostima kočnog momenta</i>	<i>103</i>
<i>Slika 10.1. Osnovni parametri modela magnetoreološke kočnice</i>	<i>155</i>
<i>Slika 10.2. Tabela i grafički prikaz B-H krive novog nelinearnog materijala C15E.....</i>	<i>156</i>

<i>Slika 10.3. Izbor jednačina i konstitutivnih relacija</i>	<i>156</i>
<i>Slika 10.4. Mreža konačnih elemenata modela prototipa 1</i>	<i>157</i>
<i>Slika 10.6. Postavka Solver-a.....</i>	<i>158</i>
<i>Slika 10.7. Ilustracija raspodele magnetskog polja magnetske indukcije u ravni</i>	<i>158</i>

Spisak korišćenih tabela

<i>Tabela 2.1. Svojstva nekih komercijalnih elektroteoloških tečnosti</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2.2. Svojstva nekih komercijalnih ferrofluida.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.3. Svojstva nekih komercijalnih magnetoreoloških tečnosti</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 3.1. Tipične vrednosti relativne permeabilnosti nekih feromagnetski materijala.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 3.2. Poređenje osnovnih magnetskih svojstava nekih feromagnetskih materijala.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3.3. Poređenje hemijskog sastava čelika AISI 1018 sa C15E i 11SMn30</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 3.4. Parametri torusa uzoraka C15E i 11SMn30.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 4.1. Osnovni parametri prvog preliminarog prototipa magnetoreološke disk kočnice</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 4.2. Osnovni parametri drugog preliminarog prototipa magnetoreološke kočnice</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6.1. Uporedni prikaz hemijskog sastava materijala korišćenih u izradi prototipa 1 i 2.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6.2. Parametri konstrukcije prototipa 1 i prototipa 2.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 7.1. Vrednosti struje primara, napona sa integratora i promene rezultatnih vrednosti H i B tokom snimanja familije histerezisnih petlji uzoraka C15E i 11SMn30, pri frekvenciji od 50 Hz</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 7.2. Numeričke vrednosti magnetskih veličina modela prototipova 1 i 2 po r osi.....</i>	<i>94</i>

Spisak korišćenih oznaka i veličina

Oznaka merna jedinica, naziv veličine;

A	m^2 , površina;
a	m/s^2 , usporenje;
B	T, magnetska indukcija;
c	-, koeficijent prigušenja
E	V/m, električno polje;
F	N, sila;
f	Hz, frekvencija;
G	G, magnetska indukcija;
H	A/m, jačina magnetskog polja;
I	A, struja;
J	kg/m^2 , moment inercije;
j	A/m^2 , gustina struje;
K	Pa/s, konzistencija;
k	N/m, koeficijent elastičnosti
M	Nm, moment;
M_S	A/m, vektor magnetizacije
M_m	Am^2 , magnetski moment
m	kg, masa;
n	-, strujni indeks;
P	W, snaga;
R	Ω , otpornost;
R_m	Az/Wb, reluktansa magnetskog polja;
R^2	-, koeficijent determinacije;
r	m, poluprečnik;
t	s, vreme;
U	V, napon;
v	m/s, brzina;
x	m, rastojanje;
\dot{x}	m/s, brzina kretanja klipa u Bingamovom modelu;
y	m, rastojanje;
\dot{y}	m/s, brzina kretanja klipa Bouc-Venovog modela u Spenserovom modelu
α	Vs/mm, balistički otklon;
ρ_m	kg/m^3 , Specifična gustina (masa) materijala;
ρ_o	Ω /m , specifična otpornost materijala;
τ	Pa, tangencijalni napon;
τ_B	Pa, napon tečenja;
ϕ	Wb, magnetski fluks;
μ	H/m, permeabilnost;
η	Pa·s, viskoznost;
$\dot{\gamma}$	1/s, gradijent brzine;
ω	rad/s, ugaona brzina;
ε_0	F/m, permitivnost vakuuma;

Spisak akronima

Akronim Značenje

MR Magnetoreološka

UKM Ukupni Kočni Moment

MKE Metoda Konačnih Elemenata

Zahvalnica

Istraživanja predstavljena u ovoj disertaciji urađena su u Laboratoriji za motore i vozila, pri Katedri za motore i vozila, Departmana za mehanizaciju i konstrukciono mašinstvo i Laboratoriji za električna merenja, pri Katedri za električna merenja, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu a u okviru projekata TR35041 i TR31046.

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, doc. dr Danijeli Miloradović, na pomoći, podršci i odličnoj saradnji.

Zahvaljujem se članovima Komisije, koji su svojim sugestijama, komentarima i savetima doprineli poboljšanju kvaliteta ove disertacije.

Dodatnu zahvalnost dugujem svim kolegama sa Katedre za motore i vozila, Katedre za teorijsku elektrotehniku i Katedre za električna merenja na pruženoj pomoći, strpljenju i razumevanju tokom izrade ovog rada.

Takođe, zahvaljujem se profesoru dr Miroslavu Prši na nesebičnom zalaganju i pomoći tokom istraživanja i merenja magnetskih svojstava materijala.

Posebno se od sveg srca zahvaljujem svojoj porodici, mojoj Ivani i deci Anastasiji i Vasiliju na svakodnevnoj podršci, ljubavi i strpljenju!!

Autor

1. Uvodna razmatranja

Opšte o kočnicama

Kočni sistem je značajan deo velikog broja mehaničkih sistema i ima poseban uticaj na njihovu opštu funkciju i kvalitet. Pored zaustavljanja ili izjednačavanja brzina obrtanja, kočni sistem ima i druge zadatke, a pre svega da zajedno sa drugim sistemima omogući siguran rad upravljanog sistema.

Neosporno je da je kočnica, kao izvršni organ svakog kočnog sistema, njegov najvažniji deo. U kočnici se ostvaruje moment potreban za usporenje, zaustavljanje ili držanje pozicije elemenata upravljanog mehaničkog sistema i u oraksi se naziva kočni moment. Kinetička energija pokretnih elemenata upravljanog mehaničkog sistema se, kod većine tipova kočnica, najvećim delom konvertuje u toplotnu energiju. Kočnice stoga treba da obezbede potrebne snage za brzo i efikasno zaustavljanje, ali i dovoljne energetske kapacitete za preuzimanje i dalji transfer toplotne energije koja se razvija tokom kočenja [1].

Od više načelno mogućih rešenja kočnica, ove zahteve trenutno najpotpunije zadovoljavaju konvencionalne frikcione kočnice, razvijajući kočne momente frikcijom, odnosno trenjem koje se stvara između pokretnih i nepokretnih elemenata. Druga rešenja, poput hidrodinamičkih ili elektrodinamičkih kočnica, ne zadovoljavaju uvek sve potrebne uslove izvršnog organa kočnog sistema. Ipak, neki od ovih uređaja poseduju određena svojstva koja su, u poređenju sa frikcionim kočnicama, dobra, a neretko i bolja. Ova činjenica stvara određen prostor za primenu nekonvencionalnih kočnica kod različitih mehaničkih sistema, kod kojih maksimalni kočni moment nije od najvećeg značaja.

Vreme odziva, način aktivacije, precizno variranje kočnog momenta, upotreba cele površine kočnog elementa itd. predstavljaju zahteve gde elektromehaničke kočnice imaju prednost u poređenju sa konvencionalnim frikcionim kočnicama. Savremene kočnice moraju da zadovolje brojne zahteve sa stanovišta usporenja i zaustavljanja upravljanog sistema, ali i sa stanovišta održavanja, kvaliteta, ekonomije itd. Uproščeno govoreći, kočnice moraju da obezbede sledeće:

- usporavanje i zaustavljanje sistema u svim okolnostima kada se za tim javi potreba, bilo da se radi o neočekivanim događajima ili o normalnom radu i to sa potrebnim usporenjima, tj. efikasnošću,
- stabilan rad sistema tokom kočenja, tj. sprečavanje pojava koje dovode do gubitka stabilnosti,
- mirno i postepeno kočenje,
- aktiviranje kočnice uz upotrebu što manje energije,
- visoku pouzdanost u svim predviđenim radnim uslovima, tj. funkcionisanje kočnog sistema sa što manjom verovatnoćom pojave otkaza, a uz to i uslove za uvid u stanje ispravnosti svih bitnih delova kočnice, posebno onih koji se habaju i koji traže zamene ili podešavanja u određenim vremenskim periodima,
- funkcionisanje uz potrebu što manjeg i što jednostavnijeg održavanja, tj. mogućnosti rada u dužim vremenskim periodima bez potreba za nekim posebnim intervencijama ili kontrolama,
- kočenje bez škrife ili drugih neželjenih pratećih pojava (zagađenje okoline mirisom ili na drugi način - opasne materije), itd.

Stepen zadovoljenja svih ovih kriterijuma predstavlja meru kvaliteta kočnice i kočionog sistema uopšte. Očigledno da kvalitet kočnog sistema predstavlja složenu kategoriju koja uključuje više komponenti.

1.1. Cilj istraživanja

Cilj ovog istraživanja je unapređenje kočnih karakteristika nekonvencionalnog tipa kočnice. U tu svrhu, odabrana je vrsta kočnica koja kočni efekat postiže promenom u strukturi kočnog medijuma. Reološka promena u materijalu koji je odabran za kočni medijum, nastaje pod uticajem magnetskog polja. Materijal odabran za kočni medijum je magnetoreološka tečnost, vrsta tzv. „pametnih materijala“ sa specifičnom reakcijom u prisustvo magnetskog polja. Na osnovu prethodnih istraživanja, odabran je tip magnetoreološke kočnice čija konstrukcija je predmet nastojanja da se ostvari unapređenje sa ciljem postizanja veće vrednosti ukupnog kočnog momenta. Rezultati ispitivanja unapređene konstrukcije poređiće se sa rezultatima ispitivanja klasične konstrukcije magnetoreološke kočnice. Odlučeno je da se u ovom istraživanju koristi disk tip kočnice, s obzirom da se vrlo često koristi u istraživanjima [2 i 3] i da poseduje najbolji odnos kočnog momenta u poređenju sa jednostavnošću konstrukcije.

1.2. Struktura rada

U prvom poglavlju disertacije izložen je pregled aktuelne literature u ovoj oblasti, definisan je problem istraživanja i predstavljene su osnovne hipoteze i metode istraživanja.

U drugom poglavlju, detaljno su opisane tzv. „pametne tečnosti“ a poseban akcenat stavljen je na sastav i svojstva magnetoreoloških tečnosti. Zatim su predstavljeni najčešće upotrebljavani matematički modeli za opisivanje nenjutnovskih tečnosti i svi režimi rada magnetoreoloških tečnosti. Na kraju je dat pregled magnetoreoloških uređaja i njihovih karakterističnih primena.

U trećem poglavlju opisan način projektovanja magnetskog kola. Ova celina rada podeljena je u tri dela. U prvom delu su prikazane osnove magnetizama. Težište drugog dela stavljeno je na teorijske osnove magnetskog kola i postojanje različitih vrsta materijala u njemu, kao i efekat koji ti materijali imaju na raspodelu magnetskog polja. U trećem delu je predstavljen eksperimentalni način određivanja nekih magnetskih svojstava feromagnetskih materijala: histerezisne krive i krive prvobitnog magnetisanja za dva različita uzorka čelika.

U četvrtom poglavlju, predstavljena je konstrukcija i princip rada magnetoreoloških kočnica. Data je podela prema obliku konstrukcije i detaljno su opisani svi tipovi. Zatim je na osnovu odabranog matematičkog modela predstavljen numerički način određivanja kočnog momenta. Prikazani su različiti metodi merenja kočnog momenta. Akcenat je stavljen na metod merenja reaktivnog kočnog momenta. Na kraju ovog poglavlja, predstavljena su dva preliminarna prototipa magnetoreoloških kočnica čija je svrha utvrđivanje konstruktivno-proizvodnih ograničenja.

U petom poglavlju, predstavljena je mogućnost usmeravanja magnetskog polja u telu radi ostvarivanja kombinovanja režima rada magnetoreološke tečnosti. Na osnovu pravila raspodele magnetskog polja kroz jezgro elektromagneta, uvedena je pretpostavka njegove raspodele kroz magnetoreološku disk kočnicu. Ukazano je na postojanje pojedinih oblasti konstrukcije magnetoreološke kočnice, koje ne sadrže magnetoreološku tečnost a gde je nepotrebno povećano magnetsko polje. Uvođenjem paramagnetskih materijala u konstrukciju, odnosno u magnetsko kolo magnetoreološke kočnice, usmerava se magnetsko polje u oblasti sa magnetoreološkom tečnošću, pri tom kombinujući dva osnovna režima rada magnetoreološke tečnosti.

Kako bi bio ostvaren uslov poređenja sličnih modela, dva nova prototipa magnetoreološke disk kočnice prikazana su u šestom poglavlju, zajedno sa ispitnim stolom. Prvo je predstavljena unapređena konstrukcija sa dodatim paramagnetskim elementima – prototip 1, a potom i klasična magnetoreološka disk kočnica – prototip 2. Prilikom izrade ova dva prototipa uzeta su u obzir

iskustva stečena sa preliminarnim prototipovima. Na kraju je predstavljena konstrukcija ispitnog stola, sa pripadajućim elementima, korišćenim za merenje veličina od interesa kod oba prototipa.

U narednom, sedmom poglavlju, predstavljeni su i diskutovani svi rezultati merenja urađeni u ovom istraživanju. U poglavlju osam, data su zaključna razmatranja, izvedeni osnovni zaključci i predloženi pravci daljih istraživanja. Korišćena literatura i prilozi dati su u poglavljima devet i deset.

1.3. Stanje istraživanja u oblasti magnetoreoloških kočnica u svetu

Magnetoreološke – MR tečnosti se intenzivno izučavaju i primenjuju od početka 90-tih godina prošlog veka, ali se pominju i mnogo ranije [4 i 5]. Uprkos činjenici da su dostupne duži vremenski period, do nedavno nije postojao veći podsticaj da se uvedu u upotrebu. Jedan od razloga za to je i strukturna nestabilnost ranijih varijanti. MR tečnost predstavlja suspenziju sačinjenu od tečnosti nosioca (obično je to silikonsko ili mineralno ulje, voda, kerozin itd.) i u njoj ravnomerno raspoređenih feromagnetskih čestica. Feromagnetske čestice su najčešće sfernog oblika i reda veličine od 1 μm do 10 μm . Obično su napravljene od gvožđa ili neke njegove legure. Ukoliko se suspenzija ovakvog sastava izloži dejstvu magnetskog polja, dolazi do nagle, ali reverzibilne reološke reakcije. Reakcija se manifestuje kroz povećanje otpora tečenja - viskoznosti MR tečnosti. Viskoznost je prirodno svojstvo tečnosti, odnosno fluida zbog kojeg se u dodirnoj površini dva fluidna sloja proizvodi napon smicanja, odnosno tangencijalni napon. Promena vrednosti viskoznosti MR tečnosti manifestuje se kao promena vrednosti tangencijalnog napona, uzrokovanog formiranjem lančastih struktura sačinjenih od feromagnetskih čestica. Lančaste strukture se formiraju u pravcu delovanja vektora magnetskog polja. Intenzitet ovakve promene jednim delom zavisi i od zapreminskog udela feromagnetskih čestica u MR tečnosti. Njihov udeo se kod komercijalnih MR tečnosti kreće između 20% i 40%, u zavisnosti od predviđene namene MR tečnosti. Zbog svojih svojstava (kratkog vremena odziva, niskog nivoa buke, jednostavnog upravljanja itd.), MR tečnosti su pogodan medijum za primenu u uređajima koji pokrivaju oblasti od tokova tečnosti, preko kontrole vibracija, pa do prenosa momenta i sile, gde do izražaja dolazi njihova mala potreba za energijom [6].

Pregled literature navodi da postoji više vrsta ovakvih materijala, često nazivanih i inteligentni materijali [2, 7, - 18]. Ipak, prema *Culshaw* [19], materijal ne može biti pametan. *Culshaw* smatra da pojedini materijali mogu samo imati reakciju na spoljašnji uticaj a u najboljem slučaju mogu dati jednoznačnu informaciju o tom uticaju. U ovom istraživanju, u upotrebi će biti termin „pametni materijal“ odnosno „pametna tečnost“.

Među pametnim tečnostima u poslednje vreme se poseban akcenat stavlja na one koje su bazirane na međusobno sličnoj osnovi. Svojstvo svih pametnih tečnosti je da im je reakcija na spoljašnji uticaj brza i direktno zavisna od tog uticaja. Ovakva reološka reakcija je, po pravilu, uvek reverzibilna.

Postoje tri vrste pametnih tečnosti:

- elektreološke tečnosti,
- magnetoreološke tečnosti i
- ferrofluidi.

Reološka reakcija elektreoloških tečnosti uslovljena je uticajem spoljašnjeg električnog polja. Kod MR tečnosti i ferrofluida reakcija je uslovljena uticajem spoljašnjeg magnetskog polja. U sva tri slučaja, reološke reakcije se mogu kontinualno varirati jačinom generisanog električnog ili

magnetskog polja [11]. U ovom istraživanju, akcenat je stavljen isključivo na promene kod MR tečnosti.

Primena MR tečnosti u uređajima za prenos momenta i sile trenutno je vrlo aktuelna. Neki od najčešće pominjanih MR uređaja su MR amortizeri, spojnice, kočnice itd. Razvoj MR amortizera je uslovljen i usmeren prema potrebama automobilske industrije. Prva istraživanja MR sistema oslanjanja rađena su krajem prošlog veka sa ciljem smanjenja prenosa, tj. efekta neželjenih vibracija kako na karoseriju tako i na samog vozača [20 i 21]. Proizvođač automobilskih komponenti *Delphi* je 2002. godine predstavio unapređeni sistem oslanjanja pod nazivom *MagneRide*. *MagneRide* je u potpunosti baziran na prilagođavanju svih radnih parametara uslovima puta i upotrebi MR tečnosti kao osnovnog radnog medijuma u amortizerima [22]. Park i Jeon [23], u svom istraživanju upotrebljavaju MR amortizere sa ciljem smanjenja efekta vibracija koje se sa vozila prenose na vozača. MR amortizer je dodat već postojećem opružnom sistemu u sedištu, a krajnji uticaj vibracija je meren pomoću akcelerometra postavljenog na kacigi na ispitanikovoj glavi. Proizvođači vozila polako uvode MR tehnologije oslanjanja i u srednjem segmentu svoje ponude [20 i 22]. Pored upotrebe u amortizerima, MR tečnosti pronalaze primenu i u uređajima poput nosača: motora, klipnih kompresora itd. U ovim slučajevima, nastale vibracije su po karakteru malih amplituda, ali visokih frekvencija [24 - 26].

Iako potrebe automobilske industrije imaju značajan uticaj na razvoj MR amortizera, ovo svakako nisu i jedini uređaji na vozilu sa potencijalom za primenu MR tečnosti. Pored njih, tu su, svakako, i kočnice i spojnice. U poređenju sa konvencionalnim hidraulički aktiviranim kočnicama i spojnica, MR kočnice i spojnice imaju manji broj pokretnih elemenata, kraće vreme odziva i manju masu [3]. Čisto električno upravljanje olakšava implementaciju naprednih sistema, npr. kod kočenja *Antilock Braking System – ABS* (sistem protiv blokiranja točkova pri kočenju) ili *Brake by wire*. Ipak, u budućnosti, pažnja se mora usmeriti ka produženju radnog veka MR tečnosti, kao i pouzdanosti same kočnice [27 i 28].

U svojim istraživanjima, Jaindl i Bansbah [29 i 30] predlažu upotrebu multidisk MR spojnice postavljene između pogonskog agregata i transmisije vozila. Optimizacijom predloženog dizajna [29], smanjuju masu MR spojnice u najvećoj mogućoj meri, a da pri tom spojnica zadržava vrednost ukupnog momenta. Mogućnost ostvarenja kontrolisanog proklizavanja MR spojnice je povoljna sa aspekta promene stepena prenosa.

Unapređenjem konstrukcije MR uređaja, posebno rotora, ostvaruje se značajno povećanje ukupnog kočnog momenta. U svojim odvojenim istraživanjima Nam i Sarkar [31 i 32] odstupaju od klasičnog oblika diska rotora MR kočnice, i uvode talasasti (parabolični) profil po obimu diskova rotora, između ostalog, i sa ciljem delovanja na deo MR tečnosti sadržane u obimnoj oblasti diska. Ovaj deo MR tečnosti se do sada obično smatrao neiskorišćenim. U poređenju sa vrednostima ukupnog kočnog momenta ostvarenim sa konvencionalnom oblikom diska MR kočnice, i Nam i Sarkar prijavljuju značajna povećanja ukupnog kočnog momenta.

Iako osnovne promene u obliku delova MR kočnice, odnosno spojnice, mogu dovesti do značajnih promena u izlaznim karakteristikama, tek je uvođenjem postupka optimizacije moguće ostvariti pun potencijal jedne takve promene u konstrukciji [28, 33 - 35]. Modelovanje MR kočnice u odgovarajućem CAD programskom paketu je sa aspekta same konstrukcije uglavnom svedeno na presek modela po osi simetrična a u zavisnosti od samog tipa MR kočnice [27, 35 i 36] i na tzv. četvrtinski model. Pored osnovnih geometrijskih parametara kočnice, za modelovanje je nužno i poznavanje magnetskih parametara materijala. U MR sistemu, poput MR kočnice, postoje najmanje dve vrste materijala od interesa, a to su: MR tečnost i čelik konstrukcije. Uobičajena je praksa da se koriste komercijalne MR tečnosti uz koje proizvođač obezbeđuje sve neophodne magnetske parametre. Pregledom literature [28, 34, 37 - 39], ustanovljeno je da se u velikom broju istraživanja

koristi čelik AISI 1018 ili njemu slični čelici. Zbog ograničenih mogućnosti pribavljanja ove vrste čelika, pristupa se odabiru čelika vrlo sličnog hemijskog sastava i eksperimentalnom utvrđivanju njegovih magnetskih svojstava. Nužno je odabrati najpogodniju zamenu i izvršiti odgovarajuća merenja [40 i 41].

Pored ograničenja vezanih za parametre čelika, svojstva i procesi u MR tečnosti mogu znatno uticati na izlazne karakteristike MR uređaja. Proces starenja MR tečnosti u znatnoj meri utiče na odnose njenih osnovnih elemenata: tečnosti nosioca, feromagnetske čestice i aditive. Remećenje masenih odnosa osnovnih elemenata MR tečnosti, takođe predstavlja negativan proces. Aditivi u MR tečnosti zaduženi su za smanjenje efekta sedimentacije [39], mada pojedina istraživanja [42 - 44] ovaj nedostatak MR tečnosti rešavaju dodavanjem komercijalnih mazivih masti umesto tečnosti nosioca. Bazični način rešavanja ovog problema je konstantno mešanje MR tečnosti u MR kočnici prema [3]. Uticaj segregacije feromagnetskih čestica od tečnosti nosioca u dodatnoj meri povećan je uticajem centrifugalne sile. Segregacija dovodi do naglih skokova u vrednosti prenošenog momenta, posebno kod MR spojnika. Ovi skokovi se javljaju u trenutku prelaska MR tečnosti iz čvrstog u tečno stanje [45].

Unapređenje konstrukcije klasične MR kočnice dovodi do povećanja vrednosti ukupnog kočnog momenta. Ipak, unapređenje konstrukcije nije ograničeno isključivo na promene geometrijskih parametara kočnice. Novim konceptom konstrukcije [3] magnetsko polje se usmerava na oblast od interesa. U ovoj novoj koncepciji MR kočnice, namotaji su pogodno pozicionirani po spoljnjem obodu statora MR kočnice. Uvođenje novih, nekarakterističnih elemenata u konstrukciju MR kočnice, poput feromagnetskih kuglica, takođe dovodi do značajnog povećanja ukupnog kočnog momenta [46]. Rešenje za siguran rada MR kočnice, čak i u slučaju katastrofalnog događaja, predloženo je uvođenjem elemenata sačinjenih od permanentnih magneta [37].

Jednostavne promene geometrijskih parametara, promena prečnika diska ili broja zavojaka namotaja, dostigle su svoj vrhunac kada je reč o povećanju ukupnog kočnog momenta, te je potrebno promeniti konstrukcijsko gledište o MR kočnicama. Ograničenja koja se ovde javljaju prvenstveno su vezana za mogućnost generisanja magnetskog polja velike jačine, ali i za njegovu nedovoljno preciznu usmerenost. Iz tog razloga, neki autori [47], predlažu postavljanje više radijalno orijentisanih namotaja. Kombinovani magnetski efekti sa više izvora magnetskog polja rezultuje povećanjem ukupnog kočnog momenta. Postavljanje paramagnetskog materijala u magnetsko kolo MR uređaja, dovodi do skretanja magnetskog polja, odnosno do njegovog usmeravanja u oblast od najvećeg interesa [48 i 49].

Usmeravanje magnetskog polja predstavlja sledeći korak u unapređenju MR sistema. Usmeravanje magnetskog polja moguće je postići na nekoliko načina – na prvom mestu uklanjanjem viška feromagnetskog materijala iz konstrukcije MR uređaja sa putanje raspodele magnetskog polja. Drugi način je povećanje magnetske reluktanse magnetskog kola, svodenjem površine poprečnog preseka jezgra elektromagneta na najmanju moguću meru. Grupa autora [50], predlaže upravo ovakav pristup, te u svrhu verifikacije rezultata izrađuje dva prototipa MR kočnice: konvencionalnu MR disk kočnicu i MR disk kočnicu sa predloženim izmenama. Dobijeni rezultati pokazuju značajno povećanje vrednosti ukupnog kočnog momenta *aktuatora 2* u odnosu na vrednosti ukupnog kočnog momenta *aktuatora 1*.

Odabir povoljnog oblika konstrukcije MR uređaja predstavlja samo osnovni način usmeravanja magnetskog polja. Često, zbog konstruktivnih ograničenja, nije moguće oduzeti višak materijala konstrukcije ili smanjiti efektivnu površinu poprečnog preseka jezgra. U ovakvoj situaciji, primena paramagnetskih materijala u konstrukciji predstavlja idealno rešenje. Postavljanjem paramagnetskih elemenata unutar raspodele magnetskog polja, ostvaruje se povećanje magnetskog polja bez, promena osnovnih geometrijskih parametara MR uređaja [49 i

51]. Na ovaj način, ostvaruje se neuniformna raspodela magnetskog polja u telu MR kočnice, pri čemu postoji potencijalna opasnost od prelaska materijala konstrukcije iz linearnog magnetskog režima u režim magnetskog zasićenja. Kao alat za potvrdu predviđenih parametara magnetskog polja, često se koriste komercijalni programski paketi zasnovani na metodi konačnih elemenata, poput: MAXWELL 2D, Comsol Multiphysics, Infolytica, Ansys/Emag 2D itd. [3, 36, 48 i 49].

Ponašanje MR tečnosti pod uticajem spoljašnjeg magnetskog polja moguće je opisati pomoću nekoliko matematičkih modela. Jedan od najčešće korišćenih matematičkih modela, koji daje vrlo dobre rezultate, je Bingham-ov (idealni ili plastični) reološki model tečenja [2, 3, 21, 27, 28, 50 i 52]. Binghamov reološki model zasnovan je na pretpostavci da se MR tečnost može posmatrati kao jedinstveno fizičko telo. Pri opterećenju, to telo prvo trpi elastične deformacije, do nivoa koji odgovara strukturnoj čvrstoći, da bi posle tog nivoa počelo da teče kao svaka viskozna tečnost. Ovaj model takođe pretpostavlja idealna svojstva MR tečnosti, linearnu promenu brzine strujanja i nepostojanje efekta klizanja. Pored Binghamovog modela, u literaturi se može pronaći još mnogo različitih matematičkih modela. Često korišćen model je i Heršel – Balklijev (Herschel–Bulkley) model [53] koji pokriva i pseudoplastična i dilatantna stanja MR tečnosti.

Neki autori [54], smatraju da prethodna dva matematička modela nisu dovoljna za potpuno opisivanje ponašanja MR tečnosti, jer problem strujanja MR tečnosti posmatraju kao jedno- ili dvodimenzionalan problem, te predlažu upotrebu drugih modela.

1.4. Polazne hipoteze i metode istraživanja

Prva hipoteza obuhvata pretpostavku da je raspodela magnetske indukcije kroz klasičnu konstrukciju magnetoreološke kočnice, kao primer otvorenog magnetskog kola, a sa aspekta generisanja kočnog momenta, nepovoljan, te da se ta raspodela može poboljšati odgovarajućim promenama u konstrukciji kočnice. Ova hipoteza se bazira na činjenici da u konstrukciji magnetoreološke kočnice postoje oblasti koje ne sadrže magnetoreološku tečnost a na koja magnetska indukcija deluje te da je zbog toga predviđeni efekat magnetske indukcije na magnetoreološku tečnost umanjen. Segmenti konstrukcije u kojima je zbog ovoga magnetska indukcija manja su, po pravilu, segmenti u kojima se generiše kočni moment.

Druga hipoteza obuhvata pretpostavku da se kombinovanjem magnetskog i paramagnetskog materijala, u konstrukciji magnetoreološke kočnice, ostvaruju uslovi za usmerenu raspodelu magnetske indukcije. Ova pretpostavka zasnovana je na činjenici da je intenzitet vektora magnetske indukcije daleko manji u paramagnetskom materijalu nego feromagnetiku.

Treća hipoteza obuhvata pretpostavku da se naknadnim usmeravanjem magnetske indukcije ostvaruje kombinovanje radnih režima magnetoreološke tečnosti. Ova hipoteza zasnovana je na pretpostavci da se zbog primene paramagnetskog materijala stvara uslov za formiranje dodatnog režima rada magnetoreološke tečnosti, koji, zajedno sa postojećim, dodatno deluje na deo magnetoreološke tečnosti. U kombinaciji, ova dva režima doprinose povećanju kočnog momenta MR kočnice.

U istraživanju će biti primenjene sledeće metode:

Svrha metode	Naziv metode	Kratak opis metode
Određivanje parametara konstrukcije magnetoreološke kočnice	Preliminarni model	Utvrđivanje osnovnih parametara i relacija magnetoreološkog uređaja. Na ovaj način bi se utvrdili mogućnosti ali i zahtevi za izradu magnetoreološkog uređaja kao i njegovi potencijali. Na osnovu tih podataka određiće se osnovni konstrukcioni parametri prototipa magnetoreološke kočnice neophodni za njenu izradu - finalni model.
	Metod prstenastog uzorka u mernom sklopu sa elektronskom integracijom	Ovim metodom određuju se karakteristike histerezisnih petlji predloženih uzoraka čelika.
	Balistički metod	Balističkim metodom određuje se kriva prvobitnog magnetisanja predloženih uzoraka čelika.

Merenje vrednosti ukupnog kočnog momenta	Eksperimentalno merenje ukupnog kočnog momenta	Svaki prototip magnetoreološke kočnice prošao bi istu seriju merenja na ispitnom stolu. Konceptija merenja bi bila takva da bi se merila vrednost reaktivnog momenta dobijenog sa statora magnetoreološke kočnice, a koji bi se prenosio na mernu čeliju preko merne poluge odgovarajuće dužine. Postojale bi tri vrste merenja: merenje frikcione, zbir frikcione i viskozne i zbir frikcione, viskozne i indukovane komponente tzv. ukupnog kočnog momenta. Frikciona komponenta ukupnog kočnog momenta utvrđuje se bez prisustva magnetoreološke tečnosti u prototipu magnetoreološke kočnice. Potom se prototipu dodaje magnetoreološka tečnost i ponovo vrši merenje, čime se meri zbir frikcione i viskozne komponente ukupnog kočnog momenta. Poslednja komponenta ukupnog kočnog momenta, indukovana komponenta, meri se u zbiru sa frikcionom i viskoznom komponentom ukupnog kočnog momenta a sa primenjenom upravljačkom strujom u namotaju.
Obrada rezultata	Interpolacioni metod Metod određivanja srednje aritmetičke vrednosti dobijenih rezultata Metod regresione analize	Predstavljanje dobijenih rezultata sa što većim stepenom tačnosti. Dobijanje finalnih oblika krivih. Zbog postojanje određenog stepena disperzije dobijenih rezultata korišće se ovaj metod. Koeficijent determinacije – R^2 je korišćeni kriterijum za ocenu tzv. dobre fita svih krivih.
Modelovanje predloženih konstrukcija magnetoreološke kočnice metodom konačnih elemenata.	Modelovanje konstrukcije magnetoreološke kočnice metodom konačnih elemenata	Na ovaj način bi se dobile dodatne informacije o raspodeli magnetskog polja i magnetske indukcije u prototipovima magnetoreoloških kočnica a posebno u oblastima koje sadrže magnetoreološku tečnost. Na osnovu ovih podataka, odredile bi se prosečne vrednosti magnetskih parametara, a zatim, odgovarajućim numeričkim postupkom, odredile vrednosti kočnog momenta, umanjenog za vrednost frikcione komponente. Ova metoda bi pomogla u utvrđivanju doprinosa kombinovanja radnih režima vrednosti kočnog momenta.

2. Pametni materijali

Kroz istoriju, ljudi su uvek oblikovali materijale koji su im bili dostupni. Sa napretkom u razumevanju osobina materijala, napredovala je i sposobnost ljudi da menja te osobine i prilagođava ih sopstvenim potrebama. Zbog velikog uticaja na razvoj čoveka, periodi ljudskog razvoja nazvani su prema vrstama materijala koje su se u tom dobu koristile: kameno, bakarno, bronzano, gvozdeno doba itd. Trenutno, materijali koji se intenzivno izučavaju su tzv. pametni materijali, materijali koji menjaju svoju mikrostrukturu i svojstva pod dejstvom spoljašnjih uslova (temperature, mehaničkog naprezanja, hemijskog delovanja, električnog ili magnetskog polja, svetlosti i dr.). Delovi mehanizama ili uređaja napravljeni od pametnih materijala, svojim svojstvima mogu zameniti i po nekoliko delova sačinjenih od konvencionalnih materijala, čime se pojednostavljuje konstrukcija tj. smanjuje njen ukupan broj delova. Ovo dalje vodi ka smanjenju habanja i mogućnosti pojave otkaza.

Fenomen promene reoloških svojstava pametnih tečnosti (kao podvrste pametnih materijala) pod uticajem spoljašnjih sila, zaokuplja ljudsku pažnju već decenijama. Oblast mehanike koja se bavi proučavanjem različitih modela odnosa: napona, deformacije i brzine deformacije, tečnih, koloidnih i čvrstih sistema pod uticajem spoljašnjih sila naziva se reologija. Naziv je osmislio Eugene Bingham (*Eugene Bingham*) 1920. godine, inspirisan Heraklitovom izrekom „*panta-rei*“ - „*sve teče*“.

Reološke osobine elektoreoloških tečnosti mogu se menjati uticajem spoljašnjeg električnog polja, dok se na reološke osobine MR tečnosti i ferrofluida utiče magnetskim poljem [20, 11, 55 - 60]. Promena vrednosti viskoznosti pod uticajem odgovarajućeg polja, najcenjenije je svojstvo svih vrsta pametnih tečnosti. U praksi su u upotrebi termini dinamička i kinematska viskoznost. Kod većine uobičajenih tečnosti, oblik karakteristike promene viskoznosti usled delovanja neke sile je linearan i prolazi kroz koordinatni početak. Ovakve tečnosti nazivaju se njutnovskim. Usled delovanja spoljašnjeg polja na pametne tečnosti, oblik karakteristike promene viskoznosti pojedinih pametnih tečnosti ne mora proći kroz koordinatni početak ili uopšte nije linearan [61]. Ovakve tečnosti se nazivaju nenjutnovskim i mogu se predstaviti pomoću nekoliko modela o čemu će biti reči kasnije.

2.1. Elektoreološke tečnosti

Elektoreološke – ER tečnosti predstavljaju suspenziju slabo provodnih čestica reda veličina od 0,1 μm do 100 μm u slabo provodnoj tečnosti nosiocu. Prvi put se spominju u istraživanjima Vinslou 1949. godine [62]. U prisustvu spoljašnjeg električnog polja, vrednost viskoznosti ER tečnosti naglo se menja. Ova promena je reverzibilnog karaktera. Elektrostatička polarizacija čestica ER tečnosti jedan je od glavnih razloga promene vrednosti viskoznosti tj. nastajanja elektoreološkog efekta. Smatra se da je razlika u dielektričnim konstantama tečnosti nosioca i čestica osnovni razlog postojanja ovog efekta. U literaturi se elektoreološki efekat može pronaći i pod nazivom Vinslovov efekat [18, 63].



Slika 2.1. Prikaz uzorka komercijalne elektreološke tečnosti, ERF-3S-I, [64]

Najčešće primenjivani model za opisivanje karakteristika ER tečnosti je Bingamova plastika [59 i 65], dok se za opisivanje polarizacije feromagnetskog materijala koristi Maksvel-Vagnerov model [59, 60 i 66]. ER tečnosti pronalaze primenu kod sistema oslanjanja, ublažavanje vibracija i udara, kočnica i sl. [18 i 57].

Podaci o vrednosti jačine električnog polja koje se koriste tokom eksperimentalnih postupaka, a koje je moguće naći u literaturi [60], reda su veličine stotina V/mm. Ovakve vrednosti jačine električnog polja mogu predstavljati nedostatke kod praktičnih aplikacija ER tečnosti. Sistemi koji koriste ER tečnosti kao izvršni i/ili posrednički medijum, smatraju se čisto električno upravljanim sistemima. Ovakvi sistemi imaju smanjenjen efekat habanja ili ga uopšte nemaju. Vreme odziva se meri u ms [67]. Neka od osnovnih svojstava nekoliko komercijalnih ER tečnosti su data u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Svojstva nekih komercijalnih elektreoloških tečnosti

Komercijalni naziv [Izvor]	LID 3354d [68]	GER [69]	ERF-3S-I [64]
Namena	Opšta	Opšta	Opšta
Veličina čestice, [μm]	do 45	0,1	-
Zapreminski udeo čestica, [%]	37,5	65	-
Gustina, [kg/m^3]	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,054 \cdot 10^{-3}$
Viskoznost, [$\text{mPa} \cdot \text{s}$]	110 pri 30 °C	60 pri 25 °C	127 pri 25 °C
Tačka ključanja, [°C]	> 200	-	-
Maksimalni napon tečenja, [kPa]	3	80	5
Boja	Siva	Bela	Siva/Bela

2.2. Ferrofluidi

Naziv ferrofluidi potiče od dve latinske reči *ferrum* - gvožđe i *fluidum* - tečnost. Ferrofluidi su koloidne suspenzije, sačinjene od čestica feromagnetskog materijala u tečnosti nosiocu (voda, ulje, kerozin, alkohol itd.) sa dodatkom surfaktanata tj. tenzida¹. Čestice feromagnetskog materijala, obično magnetit (Fe_3O_4), su reda veličine 10 nm [70], mada se koriste i različiti oksidi gvožđa (Fe, Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), kobalta (Co, CoFe_2O_4), mangan-cink ferit (MnZnFe) [71]. U literaturi se prvi put pominju šezdesetih godina prošlog veka u istraživanjima Solomona Papela [72]. Takođe, poznati su i pod nazivima ferokoloidi ili nanofluidi [71 i 73].

Kada se ferrofluid izlože delovanju spoljašnjeg magnetskog polja, dolazi do promene u njegovoj viskoznosti. Za razliku od ER tečnosti kao osnovna osobina ferrofluida se ne posmatra napon tečenja, već isključivo promenom viskoznosti. Prema Odenbahu [70], ponašanje ferrofluida pod uticajem magnetskog polja može se predstaviti na sledeći način: posmatraju se čestice feromagnetskog materijala ferrofluida koje nisu u međusobnom kontaktu i čiji je magnetski moment² stacionaran. Strujanje tečnosti nosioca izaziva rotaciju čestica čime se remeti prethodno stanje magnetskih momenata i generiše mehanički moment. Usled delovanja spoljašnjeg magnetskog polja dolazi do zakretanja feromagnetskih čestica, odnosno težnje za poravnavanjem magnetskih momenata čestica sa vektorom spoljašnjeg magnetskog polja. Ova težnja za poravnavanjem dovodi do stvaranja novog mehaničkog momenta koji se suprotstavlja prethodno pomenutom mehaničkom momentu odnosno rotiranju feromagnetskih čestica nastalom usled strujanja tečnosti nosioca. Na makroskopskom nivou ovo dovodi do promene u viskoznosti ferrofluida.

Kako bi se izbegla aglomeracija čestica i smanjila mogućnost stvaranja lančastih struktura, ferrofluidu se dodaju tenzidi tj. vrši se presvlačenje feromagnetskih čestica odgovarajućom supstancom – prevlakom. U zavisnosti od vrste i načina nanošenja prevlake, ferrofluidi se mogu podeliti na ferrofluide sa površinskom prevlakom i na ferrofluide sa jonskom prevlakom [73 i 74]. Neka od osnovnih svojstva nekih komercijalnih ferrofluida date su u tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Svojstva nekih komercijalnih ferrofluida

Komercijalni naziv [Izvor]	EMG 304 [75]	fluidMag-Amine [76]	APG 513 A [56]
Namena	Opšta	Opšta	Opšta
Veličina čestice, [nm]	10	50	10
Zapreminski udeo čestica, [%]	4.5	-	7.2
Gustina, [kg/m^3]	$1.24 \cdot 10^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Viskoznost, [mPa.s]	40	45	30
Tačka ključanja, [$^{\circ}\text{C}$]	100	-	150
Maksimalni napon tečenja, [kPa]	-	-	-
Boja	Crna	Siva/Bela	Crna

¹ Surfaktanti ili tenzidi su supstance koje snižavaju tangencijalni napon jedne materije u odnosu na drugu

² Magnetski moment predstavlja proizvod elementarne struje i površine

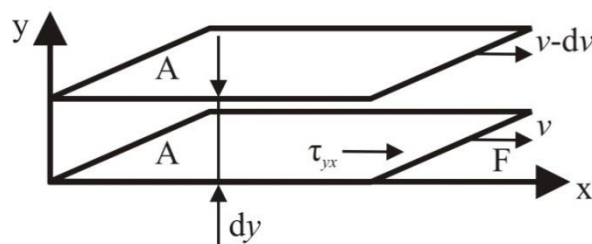
Primena ferrofluida uobičajna je u automobilske i elektronske industriji, industriji optike i biomedicini, u sistemima za podmazivanje, odvođenje toplote, dinamičko zaptivanje, kontrolu vibracija itd. [58, 74, 77 i 78]. Feroluidi se odlikuju zanemarljivo malim efektom habanja uređaja zbog prisustva feromagnetskih čestica, takođe odlikuju se visokim nivoom homogenosti i maloj količini energije neophodnoj za aktivaciju. Ipak, ferrofluidi još uvek imaju skromu primenu.

2.3. Magnetoreološke tečnosti

Magnetoreološke – MR tečnosti takođe spadaju u pametne tečnosti, koje, poput ferrofluida, reaguju na prisustvo magnetskog polja. Usled delovanja magnetskog polja na MR tečnost takođe dolazi do nagle reološke promene. Promena je reverzibilna i odigrava se u kratkom vremenskom periodu od svega nekoliko milisekundi. Naziv „magnetoreološke“ predstavlja složenicu nastalu spajanjem dva posebna termina: magnetizam i reologija.

Magnetizam je fizički fenomen materijala koji nastaje usled kretanja nosioca naelektrisanja, što za rezultat ima stvaranje privlačne ili odbojne sile prema drugim materijalima.. Materijali koji pokazuju ovakve karakteristike su danas dobro poznati i tu na prvom mestu spadaju: gvožđe - Fe, nikl - Ni, kobalt – Co, kao i njihove legure [79].

Reologija je nauka koja se bavi klasifikacijom nenjutnovskih fluida. Brzina deformacije ili gradijent brzine, kao osnovni parametar nenjutnovskog fluida, može se definisati na osnovu sledeće postavke: posmatraju se dve paralelne ploče površine A na rastojanju dy , slika 2.2. Prostor između ploča ispunjen je fluidom. Donja ploča se kreće brzinom v , a gornja ploča brzinom $v - dv$. Mala razlika u brzini dv između ploča daje za rezultat otpornu silu F koja deluje po površini A usled viskoznih efekata u fluidu. Sila F vezuje se za donju ploču da bi se održala razlika u brzinama dv između dve ploče. Sila po jedinici površine F/A poznata je kao, već pomenuti, tangencijalni napon τ . Ako se pokretna ploča kreće brzinom direktno zavisnom od primenjene sile F , obrazovaće se gradijent brzine susednih slojeva na rastojanju y , dv/dy , koji se često naziva i brzina deformacije i označava sa $\dot{\gamma}$ [80 i 81].



Slika 2.2. Gradijent brzine između dve ploče, [81]

2.3.1. Svojstva i sastav magnetoreološke tečnosti

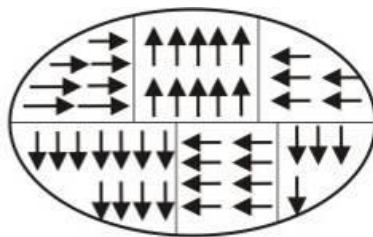
MR tečnosti su koloidne suspenzije sačinjene od čestica feromagnetskog materijala – reda veličine od $1 \mu\text{m}$ do $10 \mu\text{m}$, tečnosti nosioca – poput ulja, vode silikona i sl. i različitih aditiva, čija je uloga da smanje efekte segregacije feromagnetskih čestica [27 i 34]. Prosečnu veličinu čestice, vrstu tečnosti nosioca, kao i vrstu aditiva, određuju zahtevi specifične aplikacije. Najčešće korišćen feromagnetski materijal je prah tehnički čistog gvožđa (99,8% do 99,9%). U literaturi [11, 82 i 83] se vrlo često može pronaći i podatak da se feromagnetski materijal za proizvodnju MR tečnosti dobija od gvožđe pentakarbonila $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Proces kojim se dobija ovakav materijal, naziva se

atomizacija. Čestice su sferičnog oblika i reda veličine od 1 μm do 10 μm [2, 11 i 84]. Zapreminski udeo feromagnetskog materijala u MR tečnosti varira u zavisnosti od namene i obično se kreće u granicama od oko 30% do 40% [85], mada procenat može varirati.

Ukoliko se čestice feromagnetskog materijala posmatraju na atomskom nivou, kruženje negativno naelektrisanih elektrona oko jezgra sačinjenog od pozitivno naelektrisanih protona i elektroneutralnih neutrona može se opisati kao uspostavljanje elementarne struje. Ovako uspostavljena struja malog je intenziteta i u svojoj neposrednoj blizini pravi magnetsko polje koje se može okarakterisati magnetski momentom. M_m :

$$M_m = I \cdot S. \quad (2.1)$$

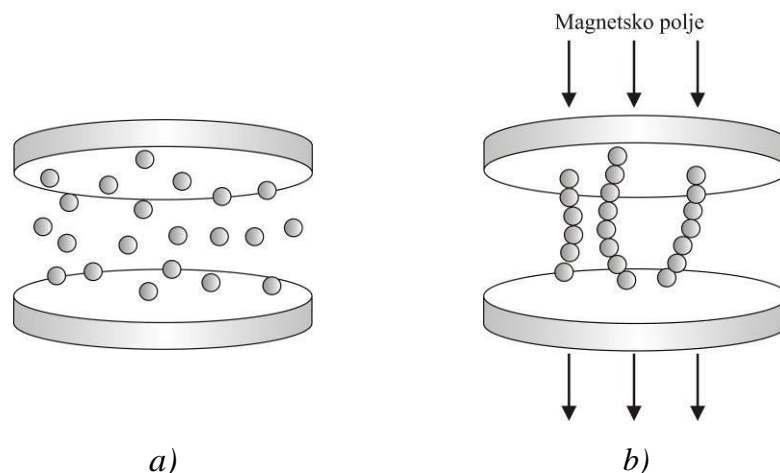
gde je I – struja a S – površina koju zatvara elektron kružeći oko jezgra. Pored kruženja elektrona oko jezgra atoma, elektroni takođe rotiraju i oko sopstvenih osa (spin), baš kao i protoni, pri čemu se stvaraju novi magnetski momenti. U odsustvu uticaja spoljašnjeg magnetskog polja, magnetski momenti su nasumično orijentisani. Unutar svake čestice feromagnetskog materijala postoje grupe molekula, reda veličine od 10^{12} do 10^{15} molekula, u kojima su magnetski momenti svih molekula orijentisani u istom pravcu i smeru, slika 2.3. Ovakve male oblasti unutar kojih su svi magnetski momenti savršeno orijentisani nazivaju se Vajsovi domeni (*Pierre-Ernest Weiss, 1865 - 1940*). U principu, Vajsov domen predstavlja jedan mali stalni (permanentni) magnet [86 i 87].



Slika 2.3. Šematski prikaz nenamagnetisanog feromagnetskog materijala - strelice simbolično predstavljaju magnetske momente atoma, [87 i 88]

Pod uticajem spoljašnjeg magnetskog polja, Vajsovi domeni unutar feromagnetskih čestica sve više se orijentišu u smeru i pravcu vektora magnetske indukcije spoljašnjeg magnetskog polja. Kada se svi domeni usmere u istom pravcu, feromagnetske čestice u MR tečnosti formiraju lančaste strukture, kao što je predstavljeno na slici 2.4, a dalja magnetizacija materijala nije moguća. Tada se kaže da je došlo do magnetskog zasićenja materijala. Svi Vajsovi domeni namagnetisani su do zasićenja.

Ukoliko se MR tečnost izloži dejstvu spoljašnjeg magnetskog polja, feromagnetske čestice formiraju lančaste strukture čiji je smer paralelan sa smerom linija odgovarajućeg magnetskog polja, slika 2.4. Na ovaj način se smanjuje pokretljivost same tečnosti. Kako bi se, i pored dejstva magnetskog polja, uspostavilo kretanje MR tečnosti, neophodno je primeniti dodatnu silu, odnosno savladati prednapon MR tečnosti.



Slika 2.4. Formiranje lančastih struktura unutar magnetoreološke tečnosti, a) bez uticaja magnetskog polja, b) pod uticajem magnetskog polja

MR tečnost može da se nalazi isključivo u jednom od dva stanja. Prvo stanje podrazumeva nepostojanje efekta spoljašnjeg magnetskog polja i u literaturi [3, 51 i 89] se vrlo često može naći pod nazivom „OFF-State“, dok drugo stanje podrazumeva prisustvo efekta magnetskog polja i naziva se „ON-State“. Neka od osnovnih svojstva nekih komercijalnih MR tečnosti su data u tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Svojstva nekih komercijalnih magnetoreoloških tečnosti

Komercijalni naziv [Izvor]	Basonetic 5030 [90]	MRF-122-2ED [91]	SF-ZY3201CF [92]
Namena	-	-	-
Veličina čestice, [μm]	~ 5	~ 5	1-10
Zapreminski udeo čestica, [%]	47	72	81
Gustina, [kg/m^3]	4120	2320-2440	3610
Temperaturni raspon, [$^{\circ}\text{C}$]	-40 do 120	-40 do 130	-20 do 100
Saturacija, [kAm^{-1}]	760	400	~ 300
Maks. napon tečenja, [$\text{kPa}/\dot{\gamma}$ [s^{-1}]]	110/100	-	375/600
Boja	tamno siva	tamno siva	tamno siva

2.3.2. Matematički modeli ponašanja magnetoreoloških tečnosti

Zbog postojanja prednapona promenljive vrednosti, prouzrokovanog uticajem spoljašnjeg magnetskog polja, ponašanje MR tečnosti ne može se opisati klasičnim njutnovskim matematičkim modelom, te se za njihovo opisivanje koriste neki od matematičkih modela predviđenih za nenjutnovske tečnosti. U nastavku teksta, predstavljeno je nekoliko najčešće korišćenih matematičkih modela. Ovi parametarski modeli, sadrže koeficijente čije se vrednosti određuju empirijskim putem, sve dok se ne dobiju modeli čiji su rezultati bliski eksperimentalnim rezultatima. Na ovaj način se dinamički odziv MR uređaja, opisuje na polu-empirijski način. Parametarski modeli se vrlo lako mogu predstaviti odgovarajućim mehaničkim modelom, u vidu opružnih, prigušnih i frikcionih elementa [93].

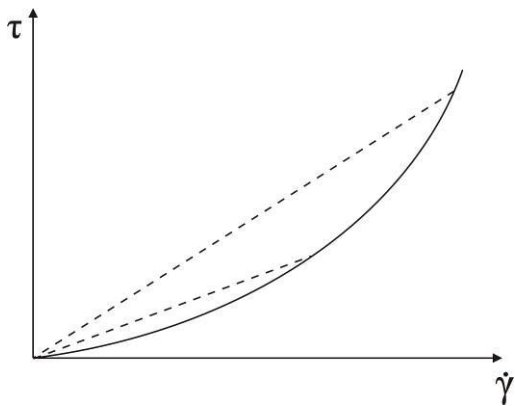
Bingamova plastika

Za njutnovske tečnosti, grafik tangencijalnog napona, τ , u funkciji od gradijenta brzine, $\dot{\gamma}$, u Dekartovom koordinatnom sistemu je dat u vidu prave (isprekidane) linije, slike 2.5 i 2.6, sa nagibom jednakim dinamičkoj viskoznosti, η . Njutnov zakon viskoznosti glasi: tangencijalni napon linearno je proporcionalan gradijentu brzine, dv/dy , u tečnosti. Konstanta proporcionalnosti poznata je kao dinamička viskoznost, η . Kod nenjutnovskih tečnosti, zavisnost $\tau - \dot{\gamma}$ nije linearna. Grafici τ u funkciji od $\dot{\gamma}$ određuju se viskozimetrom. Za različite parove τ i $\dot{\gamma}$, količnik nije isti, pa se kod nenjutnovskih tečnosti ne može govoriti o viskoznosti, već se za njih se definiše prividna viskoznost, η_a [80 i 81].

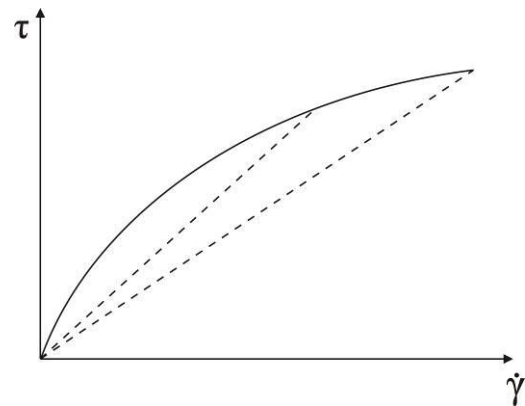
$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (2.2)$$

Za dilatantnu tečnost odnos tangencijalnog napona i gradijenta brzine raste sa porastom promene brzine, slika 2.5, dok se kod pseudo plastičnih tečnosti ovaj odnos smanjuje sa porastom gradijenta brzine, 2.6 [94].

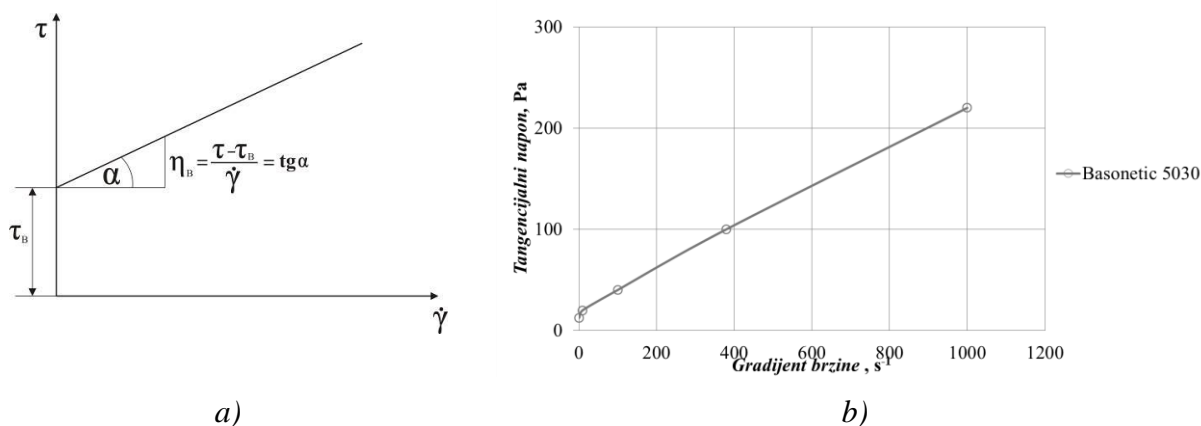
Pored pseudoplastične i dilatantne, postoji još jedan tip tečnosti sa nenjutnovskim svojstvima, a to je tzv. Bingamova plastika [94]. Dijagram $\tau - \dot{\gamma}$ za ovu vrstu tečnosti, dat je na slici 2.7 a) i b) u vidu prave linije koja kreće od tačke označene sa τ_B – prednapon, na ordinatnoj osi. Prednapon je napon koji se mora savladati da bi tečnost prešla iz stanja mirovanja u stanje strujanja. Kod MR tečnosti, ovaj napon se generiše isključivo pri delovanju spoljašnjeg magnetskog polja. Tečnost pod uticajem spoljašnjeg magnetskog polja, u stanju mirovanja ima trodimenzionalnu strukturu sa dovoljnom krutošću da se odupre bilo kom naponu manjem od prednapona. Kada se ovaj napon pređe, sistem se ponaša kao njutnovska tečnost pod tangencijalnim naponom $\tau = \tau_B$. Na slici 2.7 b) je prikazan $\tau - \dot{\gamma}$ dijagram za realnu plastiku – MR tečnost korišćenu u istraživanju u ovom radu.



Slika 2.5. Tangencijalni napon u funkciji od gradijenta brzine za dilatantnu tečnost



Slika 2.6. Tangencijalni napon u funkciji od gradijenta brzine za pseudoplastičnu tečnost



Slika 2.7. Tangencijalni napon u funkciji gradijenta brzine:
a) Bingamova plastika, b) magnetoreološka tečnost Basonetic 5030

Za nenjutnovske fluide, gradijent brzine nije linearna funkcija tangencijalnog napona, već je taj odnos je mnogo kompleksniji.

$$\dot{\gamma} = f(\tau). \quad (2.3)$$

Uobičajeno je korišćenje matematičkih modela koji opisuju reološko ponašanje nenjutnovskih tečnosti. Često se koriste Bingamov model (detaljnije opisan u nastavku teksta) i modeli stepenog zakona, jednačina (2.4) [94]:

$$\tau = K \cdot (\dot{\gamma})^n. \quad (2.4)$$

gde su K – konzistencija, a n – strujni indeks. Tečnosti koje se ponašaju po navedenom zakonu, nazivaju se tečnosti stepenog zakona. Za pseudoplastične tečnosti važi $n < 1$, a za dilatantne tečnosti je $n > 1$. U slučaju njutnovskih tečnosti je $n = 1$, a K postaje dinamička viskoznost, η .

Bingamova plastika je najčešće korišćen matematički model [2, 3, 11, 34, 95 i 96] za opisivanje ponašanja nenjutnovskih tečnosti. Vrednost prednapona MR tečnosti varira u zavisnosti od jačine primenjenog spoljašnjeg magnetskog polja. Pretpostavka, na kojoj se Bingamova plastika bazira, je da u MR tečnosti ne postoji unutrašnje kretanje naponskih slojeva, tj. da tečnost miruje, dok se ne pređe granica prednapona. Ponašanje MR tečnost Bingamovim modelom se predstavlja sledećom jednačinom:

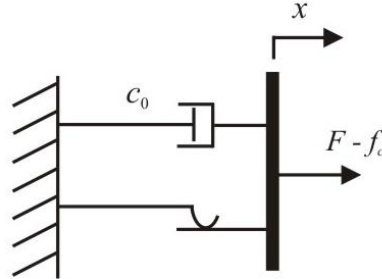
$$\tau = \tau_B + \eta \cdot \dot{\gamma}. \quad (2.5)$$

Bingamov model daje rezultate bliske eksperimentalnim, isključivo u oblastima kada je vrednost prednapona, $\tau_B > 0$, odnosno za dovoljno velike vrednosti $\dot{\gamma}$. Sa aspekta primene MR tečnosti u MR uređaju kakav je MR kočnica, ovakav model zadovoljava u smislu podudaranja teoretskih i eksperimentalnih rezultata [97].

Neki autori [97] predlažu formiranje mehaničkog modela Bingamove plastike koji kombinuje viskozno i Kulonovo trenje. Ovakav mehanički model, predstavljen na slici 2.8, kombinuje Kulonov frikcionni element u paralelnoj vezi sa viskoznim prigušnim elementom. U ovom modelu sila, F , koju ostvaruje MR uređaj predstavlja se kao:

$$F = f_c + c_0 \cdot \dot{x}. \quad (2.6)$$

gde su f_c , – Kulonova sila trenja, c_0 – koeficijent prigušenja i \dot{x} – brzina frikcionog elementa (klipa) proistekla od spoljašnje pobude. Prethodno pomenuti koeficijenti vezuju se za koeficijente prednapona, viskoznosti i gradijenta brzine, jednačina (2.5). Radi jasnijeg predstavljanja narednih modela koristiće se uniformno predstavljanje koeficijenata modela.



Slika 2.8. Bingamov model, [97]

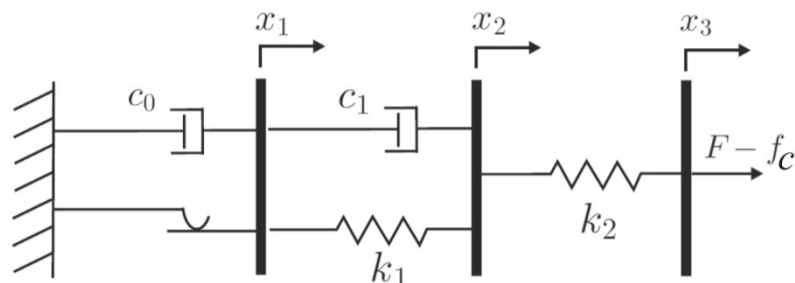
Gamota-Filisko model

U svom istraživanju, Gamota i Filisko [98] predlažu proširenje Bingamovog modela. Novi model se sastoji od Bingamovog modela u serijskoj vezi sa standardnim linearnim modelom za viskoelastična tela, poznatim i kao Zenerov model [99], slika 2.9. Modelom Gamota-Filisko opisuje se ponašanje MR tečnosti i u oblasti $\tau - \dot{\gamma}$ dijagrama od koordinatnog početka pa do tačke prednapona, u oblasti gde se u Bingamovom modelu smatralo da nema kretanja. Kao i u prethodnom slučaju, sila koju MR uređaj ostvaruje može se predstaviti u sledećem obliku:

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1 \cdot (x_2 - x_1) + c_1 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ &= c_0 \cdot \dot{x}_1 + f_c \cdot \dot{x}_1 \\ &= k_2 \cdot (x_3 - x_2) \end{aligned} \right\}, |F| > f_c. \quad (2.7)$$

$$\left. \begin{aligned} F &= k_1 \cdot (x_2 - x_1) + c_1 \cdot \dot{x}_2 \\ &= k_2 \cdot (x_3 - x_2) \end{aligned} \right\}, |F| \leq f_c. \quad (2.8)$$

gde su: c_0 i c_1 – koeficijenti prigušenja, k_1 i k_2 – koeficijenti elastičnosti MR tečnosti u oblasti do tačke prednapona, x_1 i x_2 – vrednosti pomeraja i \dot{x}_1 i \dot{x}_2 – brzine frikcionih elementa proistekle od spoljašnjih pobuda.



Slika 2.9. Gamota-Filisko model, [98]

Buc-Venov model (Bouc-Wen)

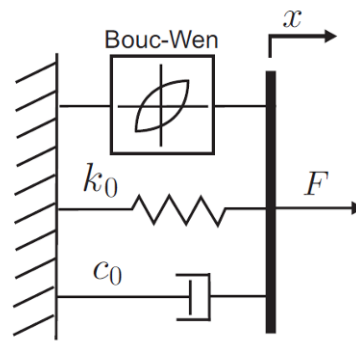
Model koji je često u upotrebi je i Buc-Venov model [100]. Ovaj model je vrlo prilagodljiv i pokriva širok spektar oblika izlaznih karakteristika MR uređaja, poput MR amortizera, koji imaju izlaznu karakteristiku histerezisnog karaktera. Mehanički model je predstavljen na slici 2.10., a sila koju MR uređaj ostvaruje je izražena kao:

$$F = c_0 \cdot \dot{x} + k_0 \cdot (x - x_0) + \alpha \cdot z. \quad (2.9)$$

gde su: α – konstanta i z – evolutivna promenljiva, izražena preko:

$$\dot{z} = -\gamma \cdot |\dot{x}| \cdot z \cdot |z|^{n-1} - \beta \cdot \dot{x} \cdot |z|^n + A \cdot \dot{x}. \quad (2.10)$$

gde promenljive β , γ i A upravljaju linearnošću sistema. Ipak, i ovaj model ima problema u poklapanju sa vrednostima u $F - \dot{x}$ dijagramu dobijenom eksperimentalnim putem, posebno u oblastima gde sila i brzina imaju različite predznake [93].



Slika 2.10. Buc-Venov model, [100]

Spenserov model

Unapređenjem Buc-Venovog modela sa težištem na oblasti gde sila i brzina imaju različite predznake dobija se Spenserov model [97]. U ovom slučaju, sila koju MR uređaj ostvaruje je predstavljena kao:

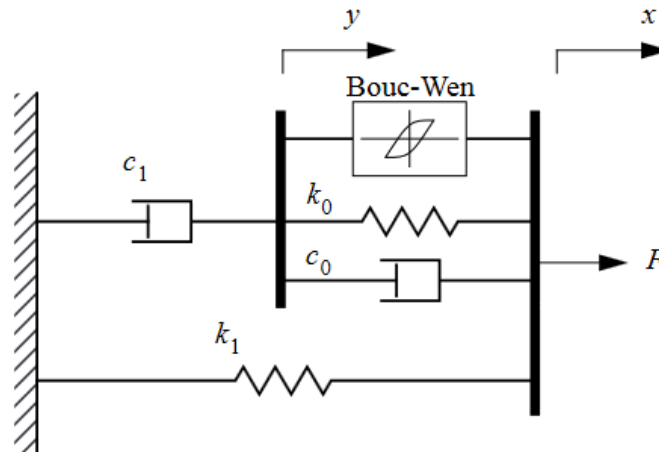
$$F = \alpha \cdot z + c_0 \cdot (\dot{x} - \dot{y}) + k_0 \cdot (x - y) + k_1 \cdot (x - x_0) = c_1 \cdot \dot{y} + k_1 \cdot (x - x_0). \quad (2.11)$$

gde je:

$$\dot{z} = -\gamma \cdot |\dot{x} - \dot{y}| \cdot z \cdot |z|^{n-1} - \beta \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \cdot |z|^n + A \cdot (\dot{x} - \dot{y}). \quad (2.12)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \cdot [\alpha \cdot z + c_0 \cdot \dot{x} + k_0 \cdot (x - y)]. \quad (2.13)$$

ovde su y – pomeraj a \dot{y} – brzina frikcionog elementa Bouc-Venovog modela u Spenserovom modelu, slika 2.11.



Slika 2.11. Spenserov model, [97]

2.3.3. Režimi rada

Pregledom literature [3, 11, 13, 51, 101 i 102], utvrđeno je da postoji više različitih režima rada MR tečnosti. Tokom eksploatacije, u MR uređaju, MR tečnost može da se nađe u jednom ili u kombinaciji dva radna režima. U odnosu na način rada MR uređaja, ali i način delovanja magnetskog polja na MR tečnost unutar uređaja, režimi rada mogu se definisati kao:

- ventilski režim,
- tangencijalni režim,
- režim pritiska i
- režim uštinuća.

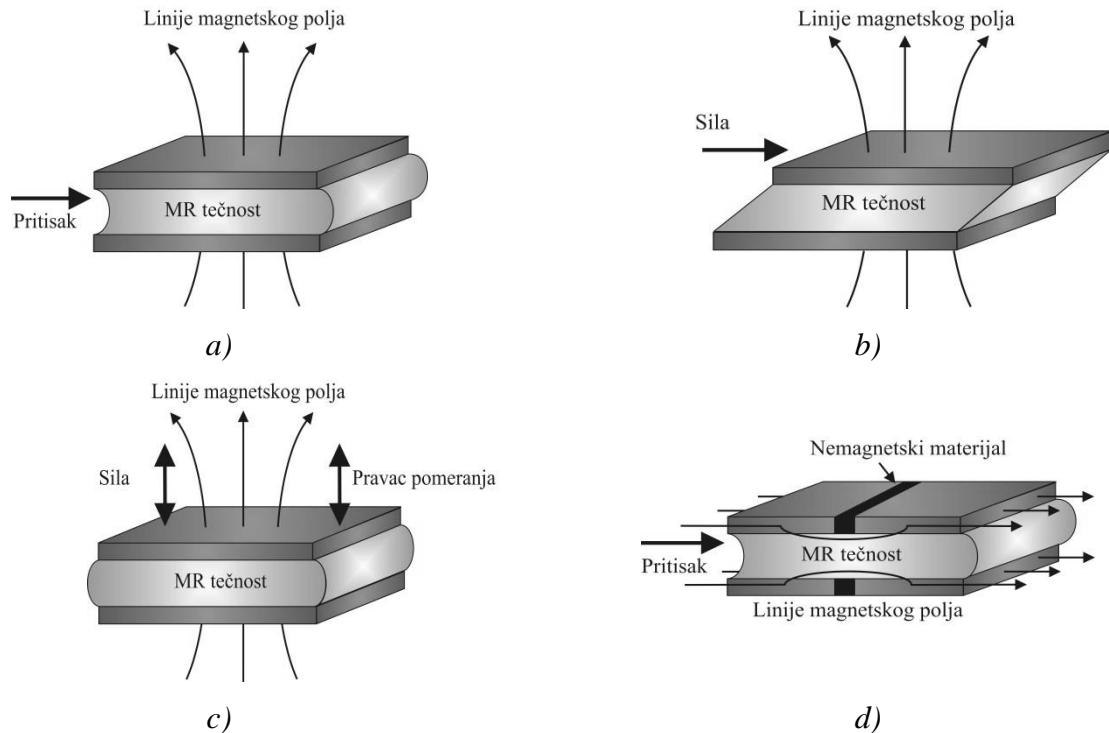
Podela je bazirana na odnosu pravca raspodele magnetskog polja i položaja MR tečnosti ili odnosu pravca raspodele magnetskog polja i pravca strujanja MR tečnosti. U svakom režimu rada, MR tečnost se posmatra u prostoru ograničenom dvema paralelnim pločama „beskonačne“ širine tako da su efekti na njihovim krajevima zanemarljivi. Ploče su sačinjene od feromagnetskog materijala koji pojačava magnetsko polje koje deluje na MR tečnost. Režimi rada MR tečnosti ilustrovani su na slikama 2.12 a) – d).

U ventilskom režimu rada, usled delovanja spoljašnje sile pritiska, MR tečnost struji kroz prostor ograničen dvema paralelnim, nepokretnim feromagnetskim pločama. Magnetsko polje deluje na MR tečnost upravno u odnosu na pravac njenog strujanja i upravno na dve ploče. Na ovaj način, može se ostvariti upravljanje protokom MR tečnosti bez upotrebe pokretnih elemenata u uređaju. Uređaji koji baziraju svoj rad na ventilskom režimu rada MR tečnosti su, uglavnom, amortizeri [12, 103 i 104].

Kod tangencijalnog režima rada, MR tečnost miruje u prostoru ograničenom paralelnim pločama. Paralelne ploče nisu fiksirane, kao u prethodnom slučaju, već imaju mogućnost relativnog kretanja jedne u odnosu na drugu, ali bez promene međusobnog rastojanja. Magnetsko polje deluje na MR tečnost sa pravcem vektora upravnim na paralelne ploče. Da bi se ostvarilo strujanje MR tečnosti u ovom režimu, sila koja deluje na paralelne ploče mora savladati prednapon MR tečnosti čija je vrednost direktno proporcionalna magnetskom polju. Uređaji koji baziraju svoj rad na tangencijalnom režimu rada MR tečnosti su uređaji za prenos momenta: spojnice i kočnice [55, 101, 105 i 106]. Težište ovog istraživanja je, između ostalog, stavljeno na konstrukciju MR kočnice u kojoj se sa tangencijalnim režimom rada kombinuju drugi režimi rada.

U režimu pritiska, MR tečnost ponovo miruje između dve paralelne ploče koje imaju isključivo mogućnost promene međusobnog rastojanja usled delovanja spoljašnje sile. Magnetsko polje deluje na MR tečnost, a pravac vektora magnetskog polja upravan je na paralelne ploče. Opseg promene međusobnog rastojanja dveju paralelnih ploča je reda veličine nekoliko milimetara i direktno zavisi od sile koja na njih utiče, ali i od magnetskog polja koje deluje na vrednost prednapona MR tečnosti. Ovaj režim rada nalazi primenu u amortizerima sa malim radnim hodom i malim koeficijentom disipacije [11, 13 i 107].

U slučaju režima uštinuća, MR tečnost struji laminarno kroz prostor ograničen dvema pločama od feromagnetskog materijala. Na svojoj putanji, MR tečnost nailazi na konični prelaz. Konični prelaz je formiran paramagnetskim materijalom. Na MR tečnost deluje magnetsko polje čiji je pravac vektora paralelan sa pravcem strujanja MR tečnosti. Ovakvim izvođenjem konstrukcije stvara se magnetsko polje najveće jačine u oblasti paramagnetskog koničnog prelaza. Reološka reakcija je najizraženija na toj maloj deonici putanje MR tečnosti, u okolini paramagnetskog koničnog prelaza. Prema dosadašnjim saznanjima, do kojih se došlo pregledom literature, do sada nije bilo konkretne realizacije uređaja u ovom režimu rada.



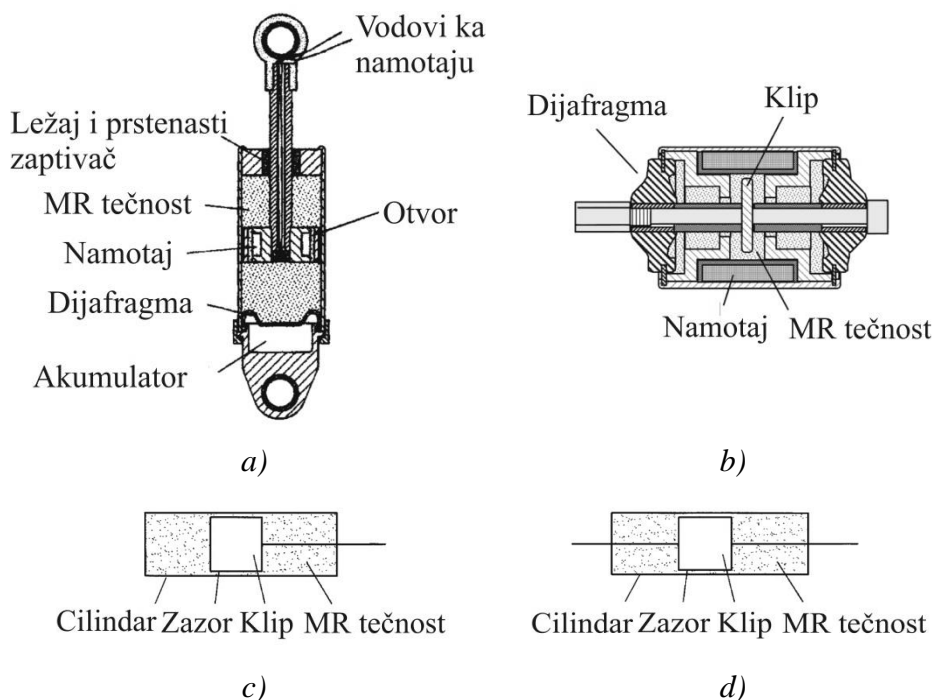
Slika 2.12. Režimi rada magnetoreoloških tečnosti:
 a) ventilski režim, b) tangencijalni režim, c) režim pritiska, d) režim uštinuća

2.3.4. Primena

Mogućnost promene vrednosti viskoznosti u realnom vremenu čini MR tečnosti atraktivnim za primenu u uređajima koji pokrivaju različite oblasti od automobilske industrije, avio industrije, optike, do sistema poput poluaktivnih-inteligentnih aktuatorskih sistema, regulacije uticaja vibracija itd. [104].

Amortizeri

Razvoj amortizera baziranih na MR tehnologiji, najvećim je delom bio uslovljen potrebama industrije, prvenstveno automobilske. MR amortizeri odlikuju se velikom disipativnom silom, kao i malom potrošnjom električne energije, pa zbog toga imaju široku primenu. Neki od primera primene obuhvataju amortizere, nosače motora i prigušivače vibracija na vozilima [21 i 23] ali i amortizere kod ortopedskih pomagala [17 i 103]. Sva rešenja amortizera baziraju se na konstrukciji sa klipnim mehanizmom zatvorenim unutar cilindra. Na slici 2.13 prikazani su primeri MR amortizera.



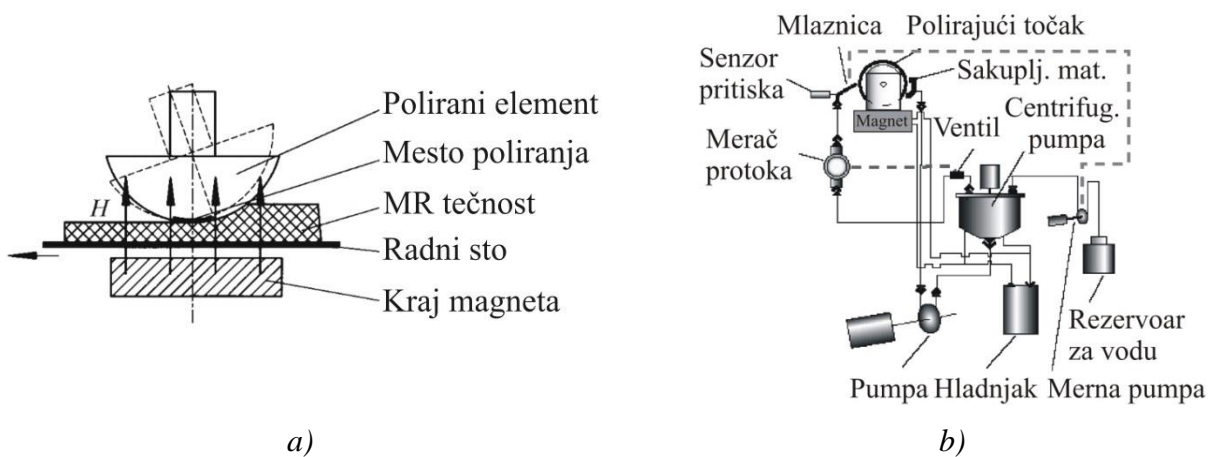
Slika 2.13. Prikaz nekoliko tipova prigušivača oscilacija u različitim režimima rada magnetoreološke tečnosti:
a) [105], b) [95], c) i d) [83]

Promena vrednosti otpora strujanja MR tečnosti vrši se variranjem magnetskog polja koje se generiše u namotajima elektromagneta. Namotaji elektromagneta smešteni su unutar samog klipa ili u njegovoj neposrednoj okolini, tako da magnetsko polje ima što je moguće veći uticaj na segment MR tečnosti u njegovoj i/ili okolini klipa. Jačina magnetskog polja, ukupan hod klipa kao i količina tečnosti, zavise isključivo od konkretne aplikacije amortizera tj. amplitude i intenziteta oscilacija.

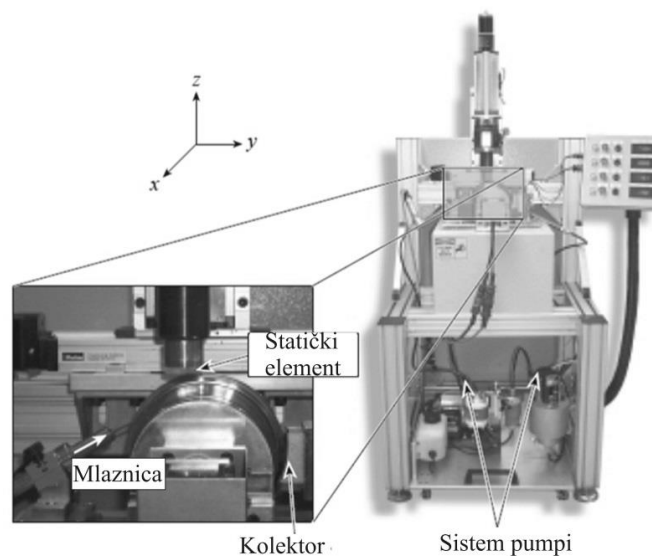
Uređaji za poliranje

Veličina feromagnetskih čestica u MR tečnostima se kreće u opsegu od 1 μm do 10 μm . Smatra se da čestice ove veličine ne dovode do značajnijeg habanja elemenata sistema tokom eksploatacije. Zbog ovako niskog nivoa habanja, odnosno mogućnosti izrazito finog odnošenja materijala, MR tečnosti su pogodne za vrlo finu obradu površina u procesima završne obrade širokog spektra materijala poput: monokristala i polikristala, vodorastvorivih materijala itd. Moguće je polirati kako ekstremno tvrde, tako i ekstremno meke materijale. Sam sastav MR tečnosti za ovu vrstu aplikacije je nešto drugačiji nego kod ostalih aplikacija. Prva razlika je da se kao tečnost nosioc uglavnom koristi voda, a na ulje, zbog apsorpcionih osobina površina koje se poliraju. Druga razlika je da, pored feromagnetskih čestica, MR tečnosti novije generacije poseduju i nemagnetske abazivne čestice [85 i 108].

Sam proces poliranja moguće je izvesti na dva načina. Prvi način je da se polirana površina kreće (rotira) u MR tečnosti slika 2.14 a), a drugi način je da se MR tečnost dovodi na poliranu površinu preko trake, slika 2.14 b) i slika 2.15.



Slika 2.14. Principi poliranja magnetoreološkom tečnošću:
 a) kretanje polirane površine kroz magnetoreološku tečnost, [83]
 b) nanošenje magnetoreološke tečnosti na poliranu površinu, [109]



Slika 2.15. Uređaj za poliranje pomoću magnetoreološke tečnosti, [108]

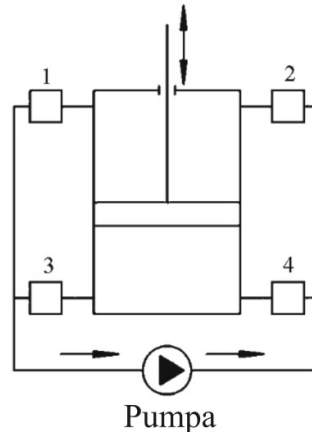
U oba slučaja, na MR tečnost u neposrednoj blizini polirane površine deluje se magnetskim poljem sa ciljem povećanja otpora, tj. povećanja intenziteta odnošenja materijala sa polirane površine. U oba slučaja postoji i sistem za dodavanje MR tečnosti u proces poliranja kao i sistem za sakupljanje viška MR tečnosti i odstranjenog materijala (nečistoća). Nivo hrapavosti koju je moguće postići pomoću ovakvih uređaja se kreće oko 1 nm.

Ventili

Prisutna je primena MR tečnost i u ulozi radnog fluida u hidrauličnim sistemima. U ovom slučaju, izvršni organ je MR hidraulični ventil sačinjen od feromagnetskog kućišta i namotaja. Kućište ventila poseduje otvore kroz koje prolazi MR tečnost, a namotaji su tako pozicionirani da ostvaruju najveći uticaj na prolazeću MR tečnost. Princip rada hidrauličkog MR ventila je vrlo sličan principu rada MR amortizera. I u ovom slučaju imamo namotaj postavljen u neposrednoj blizini mesta strujanja MR tečnosti. Uspostavljanjem struje u namotajima, generiše se magnetsko polje koje menja viskoznost MR tečnosti, a promena viskoznosti povećava otpor proticanju radnog fluida.

Na ilustraciji hidrauličnog sistema prikazanoj na slici 2.16, MR ventili obeleženi brojevima: 1, 2, 3 i 4, kontrolišu protok radnog MR fluida [83]. Uspostavljanjem struje u namotajima dijagonalno postavljenih MR ventila: 1-4 i 2-3, otpor strujanja se menja, što dovodi do promene pritiska unutar cilindra.

MR hidraulični ventili ostvaruju izuzetnu kontrolu i preciznost, a u poređenju sa konvencionalnim hidrauličnim ventilima, nemaju pokretne delove, manje su mase, i imaju brži odziv [104].



Slika 2.16. Šematski prikaz hidrauličnog sistema sa magnetoreološkim ventilima, [83]

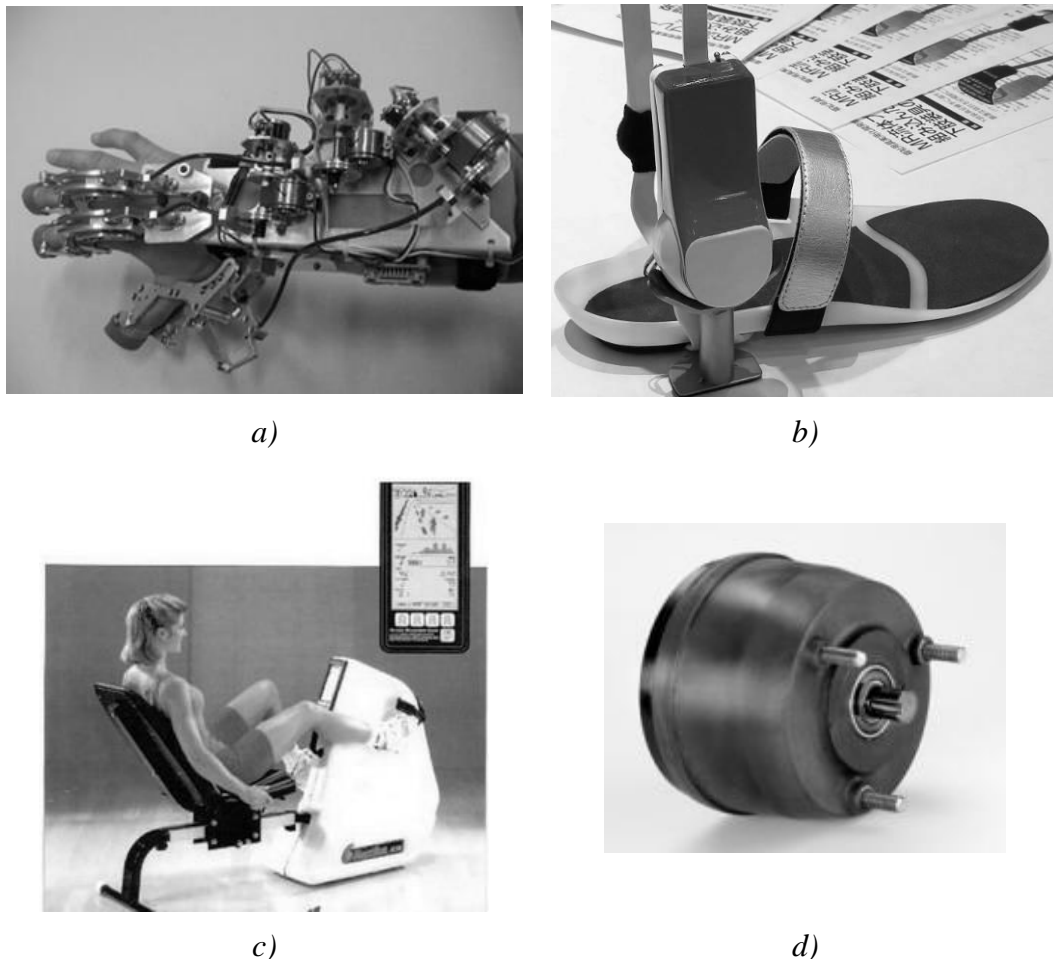
Zaptivači

Jedna od ređe obrađivanih oblasti primene MR tečnosti u praksi su MR zaptivači. U svom istraživanju Gorodkin i Kordonski [110], su ispitivali karakteristike jednostavnog MR prstenastog zaptivnog elementa. Prstenasti zaptivni element je formiran promenom viskoznosti MR tečnosti koja se nalazila u zazoru između rotirajućeg i stacionarnog dela ispitivanog sistema. Glavne prednosti ovakvog rešenja su: jednostavnost, velika zaptivna moć, nepostojanje habanja i jednostavnost održavanja. Nedostatak koji su Gorodkin i Kordonski uočili je smanjena zaptivna moć pri većim brzinama obrtanja.

Kočnice i spojnice

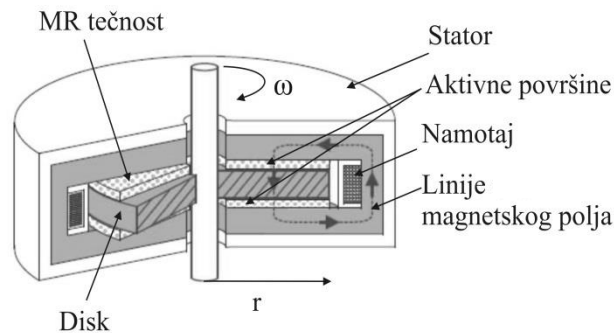
Frikciona kočnica trenutno je najčešće zastupljena vrsta kočnice. Ipak, ovu konstrukciju karakterišu određeni nedostaci, poput potrebe za periodičnom zamenom usled habanja, relativno veliko vreme kašnjenja samog sistema aktucije, dimenzije itd. [28 i 111]. Elektromehaničke kočnice predstavljaju pogodnu zamenu za frikzione kočnice, u određenim oblastima primene, jer poseduju potencijal da prevaziđu prethodno nabrojane nedostatke i imaju mogućnost primene u praktično svakom mehaničkom sistemu. Primena pametnih materijala, poput MR tečnosti, u elektromehaničkim kočnicama predstavlja nastavak njihovog razvoja.

Variranjem magnetskog polja unutar elektromehaničke kočnice koja sadrži MR tečnost, moguće je precizno menjati veličinu kočne sile. Kao i kod prethodno predstavljenih uređaja i ovde se MR tečnost nalazi između nepokretnog i pokretnog dela konstrukcije. U literaturi, ovi elementi se nazivaju rotor i stator [2 i 28]. Zbog mogućnosti kontinualnog variranja kočnog momenta, odnosno mogućnosti rada i u režimu klizanja, MR kočnice predstavljaju pogodno rešenje i za spojnice jer postoji mogućnost postepenog izjednačavanja ugaonih brzina rotora i statora, a samim tim i prenosa momenta [84 i 106]. Na slici 2.17, ilustrovano je nekoliko komercijalnih primera aplikacija MR kočnica.



Slika 2.17. Komercijalna primena magnetoreološke kočnice:
 a) haptički uređaj, [112], b) proteza nožnog članka, [113],
 c) trenažer, [114], d) magnetoreološka kočnica opšte namene, [115]

Kako bi se ostvario maksimalna jačina magnetskog polja u MR tečnosti, tzv. MR efekat, pravac vektora magnetske indukcije mora biti normalan na aktivne površine diska i statora. Aktivne površine su naspramne površine diska i statora, slika 2.18. Tipična postavka MR kočnice je takva da je namotaj elektromagneta postavljen na stator, a konstrukcija se projektuje sa ciljem da linije magnetske indukcije najvećim delom svoje putanje budu što paralelnije sa osom vratila MR kočnice [47 i 52].



Slika 2.18. Ilustracija karakteristične konstrukcije magnetoreološke kočnice, [116]

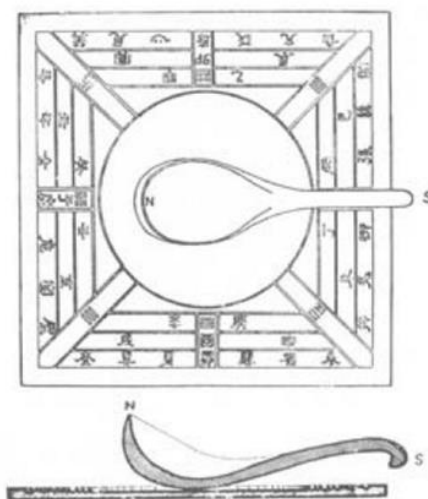
Kako bi se povećao kočni moment klasične MR disk kočnice, pored odabira pogodnih magnetskih materijala, neophodno je i unapređivanje njene konstrukcije sa ciljem povećanja intenziteta MR efekta i eliminisanje postojanja putanja magnetskog polja koje ne prolaze kroz MR tečnost. Dosadašnje konstrukcije MR kočnica imaju ograničeno delovanje magnetskog polja na MR tečnost. Tačnije, magnetsko polje se uspostavlja kroz ukupnu konstrukciju MR kočnice bez obzira na položaj MR tečnosti. Zapreminski, MR tečnost predstavlja tek deo ukupne zapremine konstrukcije MR kočnice.

3. Projektovanje magnetskog kola

3.1. O magnetizmu

Efekti koje danas nazivamo magnetskim silama bili su zapaženi još u antičko doba. Primećeno je da komadi određene gvozdene rude imaju svojstvo da privlače predmete od gvožđa. Ime „magnetski“ verovatno potiče od imena maloazijskog grada Magnezije (sadašnje Manise) u čijoj se okolini ta gvozdena ruda nalazila. Gvozdena ruda, tj. oksid gvožđa - magnetit (Fe_3O_4), ispoljava magnetske sile i danas se naziva prirodni magnet. Sve pojave u kojima se pojavljuju magnetske sile zovu se magnetske pojave [87].

Komad ovakvog prirodnog magnet, isklesanog u obliku kašike, predstavljao je glavni element uređaja pod nazivom „pokazivač juga“, koji se u drevnoj Kini koristio pri orijentaciji u prostoru, slika 3.1. Kada se tzv. kašika postavi na odgovarajuću podlogu, dolazi do poravnjanja drške kašike sa pravcem Zemljinog magnetskog polja u smeru juga. Dokazi upotrebe „pokazivača juga“ mogu se pronaći posmatrajući obrasce gradnje pojedinih starih naselja u Kini. Ovaj uređaj predstavlja preteču kompasa.



Slika 3.1. Magnetski uređaj korišćen u drevnoj Kini za orijentaciju u prostoru, [117]

Pojava veštačkih magnetata tj. elektromagnetata pokazala se izuzetno korisnom, posebno kod pobude elektromotora i generatora. Napredak u oblasti istraživanja fenomena magnetizma, duguje se prvenstveno radu i istraživanju u oblasti metalurgije [117].

3.1.1. Magnetski materijali

Prema karakteru ukupnog magnetskog momenta elementarnih čestica koje sadrže, molekuli svih supstanci mogu se podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju molekuli čiji je ukupni magnetski momenat jednak nuli, tj. u kojima se magnetski momenti pojedinih čestica poništavaju. U odsustvu stranog magnetskog polja, ovakve supstance ne stvaraju magnetsko polje niti ispoljavaju magnetska svojstva. U drugu grupu spadaju molekuli kod kojih se magnetski momenti pojedinih čestica ne poništavaju, tj. postoji neki rezultatni magnetski moment. U okolini ovakvih molekula postoji lokalno magnetsko polje, koje potiče od elementarnih čestica, koje se kreću unutar

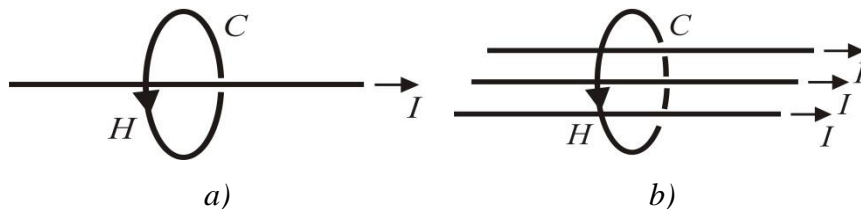
molekula. Supstance koje se sastoje od molekula prve grupe nazivaju se dijamagnetski materijali - dijamagnetici. Supstance koje se sastoje od molekula druge grupe dele se dalje na dve podgrupe. U prvu podgrupu spadaju materijali kod kojih je interakcija između molekula sasvim mala i nazivaju se paramagnetski materijali – paramagnetici. U drugu podgrupu spadaju materijali kod kojih je interakcija između molekula veoma jaka i nazivaju se feromagnetski materijali - feromagnetici [87].

U feromagnetske materijale spadaju: gvožđe (Fe), kobalt (Co), nikl (Ni), gadolinijum (Gd), disporzijum (Dy), terbijum (Tb), holmijum (Ho), erbijum (Er) i njihove legure. Među navedenim elementima najizrazitije feromagnetske osobine imaju prva četiri elementa. Često se ova četiri elementa nazivaju i osnovni feromagnetski elementi. U paramagnetske materijale spadaju: natrijum (Na), magnezijum (Mg), litijum (Li), volfram (W), aluminijum (Al) itd. Aluminijum često ima ulogu nemagnetskog materijala u magnetskom kolu.

Svakom feromagnetskom materijalu odgovara karakteristična temperatura koja se naziva Kirijeva feromagnetska temperatura i označava se sa T_c . Ispod i iznad Kirijeve feromagnetske temperature magnetska svojstva feromagnetskih materijala se bitno razlikuju [118].

3.1.2. Amperov zakon

Amperov zakon opisuje vezu između intenziteta električne struje u provodniku, I , u amperima, A, i jačine rezultujućeg magnetskog polja, H , u A/m. Zakon kaže da je linijski integral tangencijalne komponente magnetskog polja po zatvorenoj konturi C jednak ukupnoj struji obuhvaćenju tom konturom, bez obzira na broj provodnika. Važno je primetiti da je H nezavisno od karakteristika materijala [87 i 119].



Slika 3.2. Magnetsko polje u okolini provodnika:
a) generisano jednim provodnikom, b) generisano sa N provodnika.

Za jedan provodnik je:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I. \quad (3.1)$$

dok za N provodnika:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I. \quad (3.2)$$

Proizvod $N \cdot I$ se naziva magnetomotorna sila, F_{mm} , i izražava se u Amper-zavojcima, Az.

3.1.3 Veza magnetskog polja i magnetske indukcije

Magnetska indukcija, B , predstavlja meru jačine magnetskog polja. Jedinica magnetske indukcije je Tesla, T, mada se u literaturi često mogu naći i jedinice poput Gausa, G i game, γ , gde su odnosi G i γ prema T: $G=10^{-4} \cdot T$ i $\gamma=10^{-9} \cdot T$. Za razliku od magnetskog polja, magnetska indukcija zavisi od svojstva materijala. Veza između B i H je data kao:

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H. \quad (3.3)$$

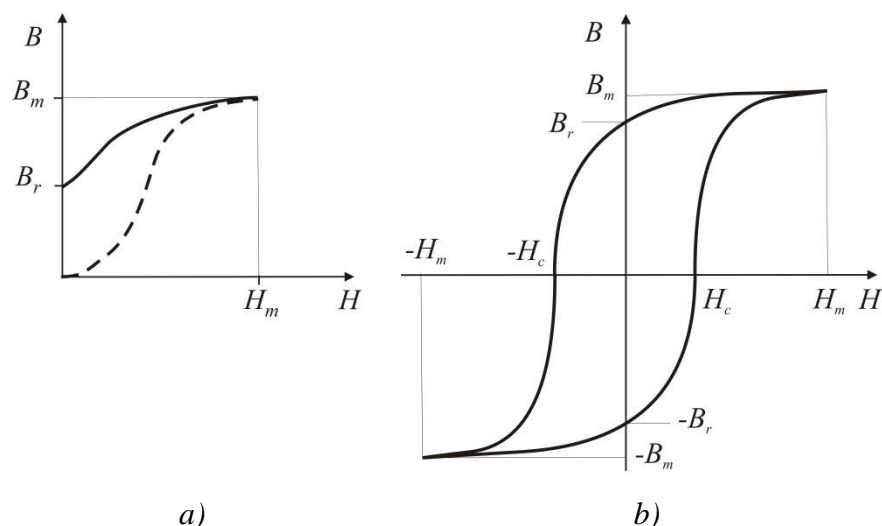
gde je: μ_0 – permeabilnost vakuuma i ima vrednost: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m dok je μ_r – relativna permeabilnost materijala i nema jedinicu. Za neferomagnetske materijale je $\mu_r \approx 1$. Za feromagnetske materijale, vrednost relativne permeabilnosti daleko prevazilazi 1. Neke tipične vrednosti relativne permeabilnosti feromagnetskih materijala, date su u tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Tipične vrednosti relativne permeabilnosti nekih feromagnetski materijala, [87]

Materijal	Vrednost relativne permeabilnosti
Elektrolitičko gvožđe	275000
Slabo legiran silicijum čelik	52000
Jako legiran silicijum čelik	8300
Liveno gvožđe	1000
Magnetoreološka tečnost	5

Veza $H-B$ nije linearna. Ipak, u svrhu modelovanja, može se uzeti da je ovaj odnos linearan u određenim segmentima krive. Na slikama 3.3 a) i b) predstavljen je primer oblika $H-B$ krive za feromagnetski materijal. Kada se magnetsko polje prvi put primeni na jedan ovakav materijal, magnetska indukcija unutar materijala na početku, ima spor priraštaj, potom malo brži, pa ponovo spor, da bi na kraju stigla do vrednosti saturacije, B_m . Na slici 3.3 a), ova kriva je predstavljena isprekidanom linijom i naziva se kriva prvobitnog magnetisanja. Svaki materijal poseduje specifičan oblik krive prvobitnog magnetisanja. Kada se sada krene sa promenom u suprotnom smeru i H počne da se smanjuje, B se smanjuje sporije - puna linija na slici 3.3 a). Kada se H spusti na vrednost nula, B se ne smanjuje do nule i deo indukcije ostaje u materijalu. Ovaj ostatak se naziva remanentna magnetska indukcija, B_r . U tom trenutku, materijal počinje da se ponaša kao permanentni magnet.

Ukoliko magnetsko polje nastavi da se menja i promeni smer (postane negativno), vrednost magnetske indukcije će u jednom trenutku pasti nulu, a za tačno određenu vrednost magnetskog polja. Ova vrednost magnetskog polja se naziva koercitivno polje i obeležava se sa H_c . Menjajući naizmenično vrednosti magnetskog polja, smanjujući i povećavajući je u oba smera, menjaju se i vrednosti magnetske indukcije, te dobijamo histerezisni oblik krive, slika 3.3 b) [87].



Slika 3.3. Ilustracija $H - B$ krive feromagnetskog materijala:

a) kriva magnetisanja, b) tipična histerezisna kriva

B_r – remanentna magnetska indukcija, H_c – koercitivno magnetsko polje, [87]

U tabeli 3.2 predstavljeno je poređenje nekoliko najbitnijih mekih magnetskih legura prema magnetskim svojstvima.

Tabela 3.2. Poređenje osnovnih magnetskih svojstava nekih feromagnetskih materijala, [87]

Materijal	Prag saturacije	Relativna permeabilnost
Gvožđe - Kobalt	≈ 2.4 T	do 3500
Gvožđe - Nikl	≈ 1.2 T	do 375000
Gvožđe - Silicijum	≈ 2 T	do 52000

Materijali sa velikim vrednostima H_c su veoma pogodni za pravljenje permanentnih magneta i karakterišu se kao tvrdi magnetski materijali. Nasuprot ovome, materijali koji se koriste pri izradi jezgara elektromagneta treba da imaju što je moguće manju vrednost H_c i označavaju se kao meki magnetski materijali. U elektrotehničkoj praksi svi feromagnetski materijali se dele u dve velike grupe: magnetski tvrde (kod kojih je koercitivno polje veliko, reda veličine 5000 – 50000 A/m) i magnetski meke (kod kojih je koercitivno polje malo, reda veličine 5 – 150 A/m) [87]. Meki magnetski materijali se dalje mogu klasifikovati prema svojim vrednostima saturaciji i relativne permeabilnosti. Karakteristika magnetski mekih materijala je da im je površina, koju zatvara $H - B$ kriva, mala. Materijali sa velikom saturacijom i velikom permeabilnošću imaju prednost pri odabiru materijala za jezgra elektromagneta, pošto se sa njima dobijaju kompaktniji uređaji i manja potrošnja energije.

3.1.4. Magnetska permeabilnost feromagnetskih materijala

Zbog složene zavisnosti magnetskog polja od magnetske indukcije i praktičnih potreba, za feromagnetske materijala definiše se više različitih magnetskih permeabilnosti. Svaka od permeabilnosti predstavlja lokalno svojstvo materijala i u manjoj ili većoj meri zavisi od jačine magnetskog polja u posmatranoj tački.

Normalna permeabilnost

Normalna permeabilnost, μ , je predstavljena kao odnos vektora magnetske indukcije i vektora magnetskog polja u tačkama krive normalnog magnetisanja, jednačina 3.3. Zbog nelinearne zavisnosti magnetskog polja od magnetske indukcije duž krive prvobitnog magnetisanja, normalna permeabilnost je funkcija jačine polja. Pri slabim magnetskim poljima zavisnost magnetskog polja od magnetske indukcije je skoro linearna, pa je u tom slučaju normalna permeabilnost nezavisna od jačine magnetskog polja. U jačim magnetskim poljima, feromagnetski materijal je namagnetisan do zasićenja i normalna permeabilnost materijala teži permeabilnosti paramagnetskih materijala:

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} = \mu_0 \left(1 + \frac{\vec{M}_S}{\vec{H}} \right) \approx \mu_0. \quad (3.4)$$

gde je \vec{M}_S – vektor magnetizacije.

Na osnovu ovoga, može se zaključiti da je pogrešno govoriti da je glavna karakteristika feromagnetskih materijala velika permeabilnost. U literaturi [87], a i u praksi, normalna permeabilnost se naziva samo permeabilnost. Zbog toga će se u nastavku ovog rada koristiti isključivo ovaj termin.

Diferencijalna permeabilnost

Diferencijalna permeabilnost, μ_d , definisana je kao:

$$\mu_d = \frac{dB}{dH}. \quad (3.5)$$

u tačkama krive magnetisanja ili histerezisne krive. Zato se pri korišćenju diferencijalne permeabilnosti mora voditi računa na koju se krivu odnosi. I diferencijalna permeabilnost je funkcija magnetskog polja ali pri $H \rightarrow 0$, μ_d je nezavisna od magnetskog polja jer u ovim tačkama magnetska indukcija linearno zavisi od magnetskog polja [118].

Reverzibilna permeabilnost

Reverzibilna permeabilnost, μ_{rev} , je definisana kao:

$$\mu_{rev} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}. \quad (3.6)$$

Reverzibilna permeabilnost je jednaka normalnoj permeabilnosti za $H \rightarrow 0$. Pored prethodno definisanih permeabilnosti, u praksi se definišu i druge permeabilnosti kao što je npr. amplitudska permeabilnost.

3.1.5. Magnetski fluks i Gausov zakon

Fluks vektora magnetske indukcije (kraće magnetski fluks a često i samo fluks), ima jedno, ali veoma važno svojstvo: *magnetski fluks je jednak nuli kroz zatvorenu površ bilo kog oblika*. U prvoj iteraciji se može posmatrati površ, S , koja se nalazi u magnetskom polju. Po definiciji, fluks vektora magnetske indukcije kroz tu površ jednak je zbiru skalarnih proizvoda $\vec{B} \cdot d\vec{S}$ po površini. Integral magnetske indukcije koja prolazi kroz površinu je magnetski fluks ϕ . Jedinica magnetskog fluksa je Weber, Wb. Koristeći uobičajno obeležavanje za zbir velikog broja vrlo malih veličina, može se napisati sledeće [87 i 120]:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (3.7)$$

Linije magnetskog polja uvek su neprekidne. Ovo znači da je fluks koji prodire u zatvorenu površinu jednak fluksu koji iz te površine izlazi. Za zatvorenu površinu S imamo:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (3.8)$$

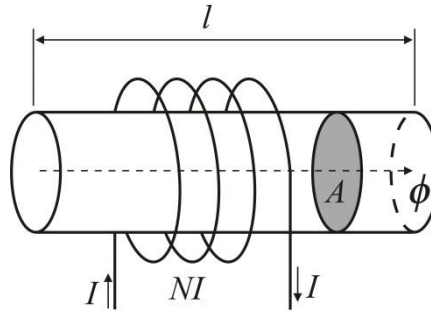
3.2. Projektovanje magnetskog kola

Jedna od najčešćih primena feromagnetskih materijala je pri formiranju jezgra elektromagneta. Oblik jezgra i veličina njegovog poprečnog preseka mogu biti različiti. Moguće je postojanje različitih vrsta i veličina poprečnih preseka u samoj konstrukciji jezgra. Kako bi se od feromagnetskog jezgra formirao elektromagnet, potreban je najmanje jedan zavojak na tom jezgru, kroz koji će se uspostaviti struja odgovarajućeg intenziteta, a magnetski fluks će se skoro u potpunosti uspostaviti kroz feromagnetsko jezgro. Ovakav sistem se naziva magnetsko kolo. Postoje i drugačije konfiguracije, sa više tela kroz koje se uspostavlja magnetski fluks, koje se mogu okarakterisati kao magnetska kola, ali će se u ovom radu pod terminom magnetskog kola podrazumevati: sistem jezgro-namotaj. Projektovanje magnetskih kola podrazumeva:

- određivanje svojstava materijala jezgra i parametara namotaja i
- određivanje fluksa kroz magnetsko kolo.

3.2.1. Magnetsko kolo

Posmatra se jezgro elektromagneta, sačinjeno od magnetski mekog materijala – gvožđa sa poprečnim presekom veličine A , slika 3.4. Sa N je obeležen broj zavojaka namotaja oko jezgra, kroz koje protiče struja jačine I . Iako namotaji nisu ravnomerno raspoređeni po celom jezgru, proizvod $N \cdot I$ stvara magnetski fluks u jezgru. Magnetski fluks uvek „bira“ feromagnetski materijal pre nego materijal kao što je npr. vazduh. U prvoj aproksimaciji, može se posmatrati da ceo magnetski fluks lokalizovan u jezgru i da homogeno prolazi kroz poprečni presek jezgra. Ovakva konfiguracija se naziva magnetsko kolo.



Slika 3.4. Jednostavno magnetsko kolo

Ukoliko se Amperov zakon primeni na kolo koje je prikazano na slici 3.4, po putanji u centru jezgra, dobijamo izraz za magnetomotornu silu, F_{mm} :

$$F_{mm} = N \cdot I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}. \quad (3.9)$$

Iz Gausovog zakona, po površini poprečnog preseka magnetskog kola, A , dobijamo:

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (3.10)$$

Ukoliko su vrednosti poprečnog preseka i magnetske indukcije konstantne po celom kolu, može se smatrati da je i fluks konstantan po celom kolu. Tada jednačina (3.10) postaje:

$$\phi = B \cdot S. \quad (3.11)$$

Iz veze magnetskog polja i magnetske indukcije, magnetsko polje je takođe konstantno po celom kolu i jednačina (3.9), postaje (3.12):

$$N \cdot I = H \cdot l = \frac{B}{\mu} \cdot l. \quad (3.12)$$

gde l predstavlja dužinu konture unutar magnetskog kola, slika 3.4. Kombinujući jednačine (3.11) i (3.12) dobija se:

$$\phi = \frac{N \cdot I}{\mu \cdot A} = \frac{F_{mm}}{\mu \cdot A}. \quad (3.13)$$

Magnetski fluks i magnetomotorna sila u magnetskom kolu se smatraju analogne intenzitetu struje, I , i elektromotorne sile, U , u električnom kolu, dok je količnik $\frac{l}{\mu \cdot A}$ analogan električnoj otpornosti i definisan je kao reluktansa magnetskog polja:

$$R = \frac{l}{\mu \cdot A}. \quad (3.14)$$

Odavde se vidi da jednačina (3.13) može biti napisana kao:

$$F_{mm} = R \cdot \phi. \quad (3.15)$$

Jednačina (3.15) se naziva Omov zakon magnetskog kola. Magnetsko kolo sa slike 3.4 se može zameniti električnim ekvivalentom. Analogija sa električnim kolom je takva da se isti zakoni, koji su prvobitno postavljeni za električno kolo, koriste i za magnetsko kolo. Ekvivalent prvog

Kirhofovog zakona³ koji se primenjuje za magnetsko kolo je izveden iz Gausovog zakona i primenjen na magnetski fluks umesto na struju, I :

$$\sum_{k=1}^n \phi_k = 0. \quad (3.16)$$

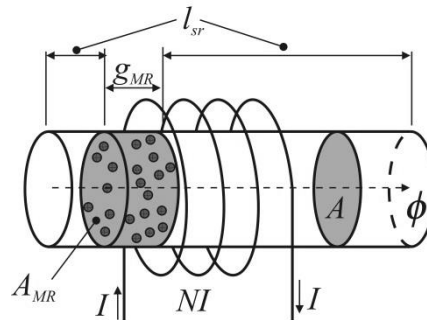
gde je n – ukupan broj magnetskih flukseva. Drugi Kirhofov zakon se takođe može primeniti i na magnetska kola. Primenom Amperovog zakona dobijamo:

$$\sum_{k=1}^n F_{mm_k} = \sum_{k=1}^m R \cdot \phi_k. \quad (3.17)$$

gde je n – broj primenjenih magnetomotornih sila a m je broj $N \cdot I$. Jednačina (3.17) znači da je suma svih magnetskih flukseva u magnetskom kolu jednaka broju $N \cdot I$ u tom kolu.

3.2.2. Magnetsko kolo sa procepom ispunjenim magnetoreološkom tečnošću

Posmatra se jezgro elektromagneta, sačinjeno od magnetski mekog gvožđa, sa poprečnim presekom površine A i poprečnim procepom površine A_{MR} , ilustracija na slici 3.5. Ova konfiguracija odgovara situaciji kada se parametrima MR kočnice upravlja preko parametara MR tečnosti. Kada se na MR tečnost ne deluje magnetskim poljem, vrednost njene viskoznosti je minimalna.



Slika 3.5. Jednostavno magnetsko kolo sa procepom ispunjenim magnetoreološkom tečnošću

Ekvivalentno električno kolo, magnetskom kolu sa slike 3.5 daje drugi Kirhofov zakon u obliku:

$$N \cdot I = R_{MR} + R_F \cdot \phi. \quad (3.18)$$

gde su: R_{MR} i R_F vrednosti reluktansi MR tečnosti i feromagnetskog materijala magnetskog kola, respektivno. Odatle sledi:

$$\phi = \frac{N \cdot I}{R_{MR} + R_F} = \frac{N \cdot I}{\left(\frac{g_{MR}}{\mu_{MR} \cdot A_{MR}} \right) + \left(\frac{l_{sr}}{\mu \cdot A} \right)}. \quad (3.19)$$

³ Prvi Kirhofov zakon za čvor u kome je vezano n provodnika: $\sum_{k=1}^n I_k = 0$ [120].

gde su: g_{MR} , l_{sr} , μ_{MR} i A_{MR} , ukupna dužine procepa ispunjenog MR tečnošću, srednja dužina konture u gvožđu, permeabilnost magnetoreološke tečnosti i veličina aktivne površine koju pokriva magnetoreološka tečnost, respektivno. Jednačina (3.19) je ekvivalentna izrazu:

$$H_{MR} = \frac{\phi}{\mu_{MR} \cdot A_{MR}} = \frac{N \cdot I}{g_{MR} + l_{sr} \cdot \left(\frac{\mu_{MR}}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{A_{MR}}{A} \right)}. \quad (3.20)$$

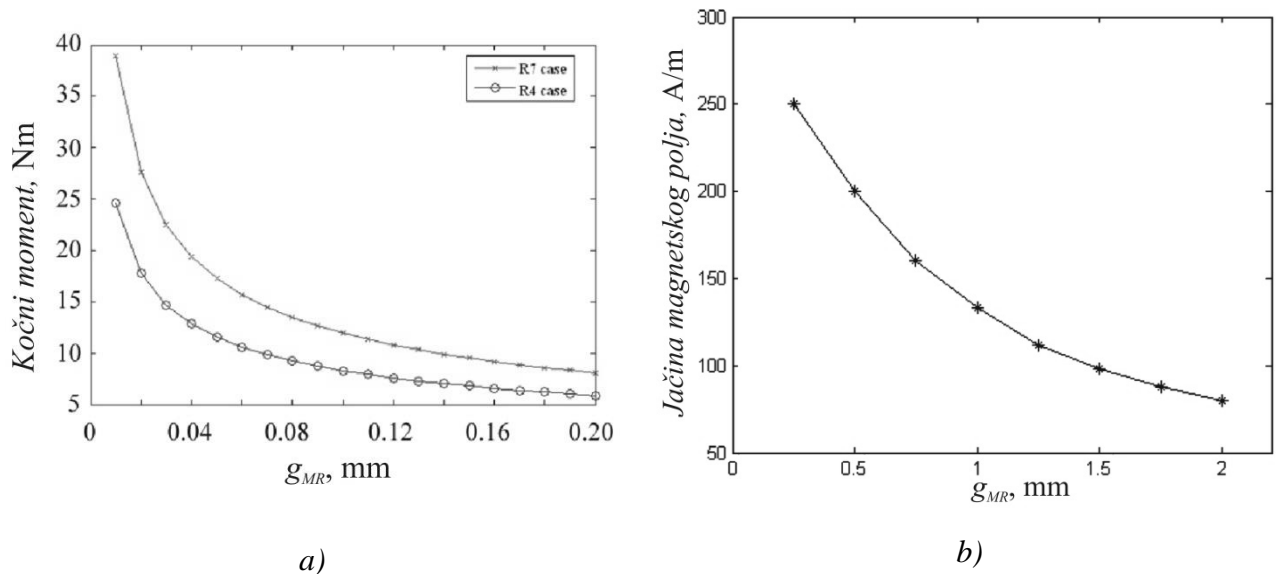
gde je $\mu \approx 1000 \cdot \mu_{MR}$. Ukoliko se pretpostavi da je l_{sr} odgovarajuće dužine i da su površine poprečnih preseka jezgra i procepa jednake, iz jednačine (3.20) dobija se:

$$\phi = \frac{N \cdot I}{R_{MR}}. \quad (3.21)$$

Na kraju, jačina magnetskog polja u MR tečnosti u procepu je:

$$H_{MR} = \frac{N \cdot I}{g_{MR}}. \quad (3.22)$$

Uticao promene veličine g_{MR} , jednačina (3.22), ekvivalentan je promeni jačine magnetskog polja MR tečnosti procepa [31 i 101]. Smanjenjem veličine g_{MR} utiče se na porast jačine magnetskog polja, a samim tim i na vrednost prednapona MR tečnosti.

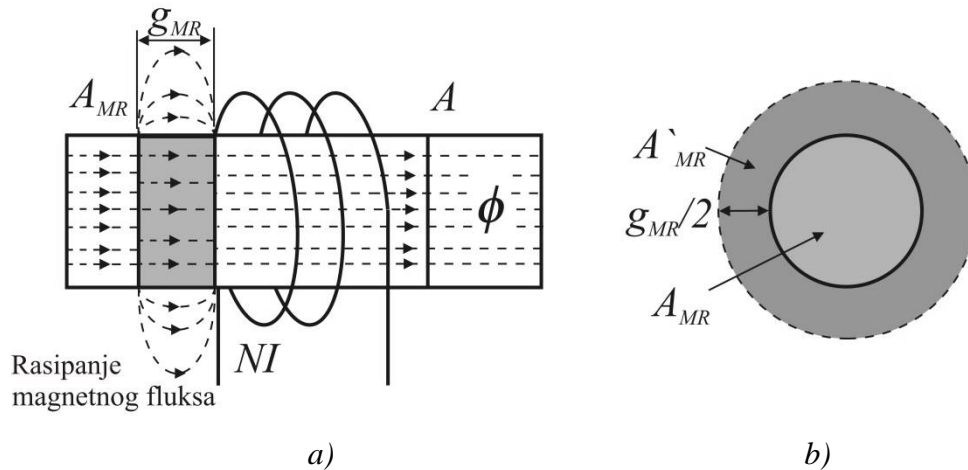


Slika 3.6. Uticaj promene veličine procepa sa magnetoreološkom tečnošću na kočni moment i jačinu magnetskog polja:
a) [31], b) [101]

Takođe, smanjenjem veličine g_{MR} smanjuje se i broj potrebnih amper-zavojaka, $N \cdot I$, neophodnih za generisanje magnetskog polja iste jačine. Ipak, smanjenje veličine procepa ima svojih ograničenja kada su u pitanju izrada elemenata MR uređaja i mogućnosti njegove precizne montaže. Prema [101], kao preporuka navodi se da veličina procepa treba biti u rasponu od 0,25 mm do 2 mm. Na slikama 3.6 a) i b) su ilustrovane promene kočnog momenta MR kočnice i promene magnetskog polja u zavisnosti od promene veličine procepa.

3.2.3. Rasipanje magnetskog polja

U prethodnom delu, procep u magnetskom kolu i njegova svojstva smatrana su identičnima sa svojstvima jezgra elektromagneta sačinjenog od magnetski mekog gvožđa. Ipak, ovo nije sasvim tačno, pošto se rasipanje magnetskog fluksa javljaju na prelazima sa jezgra na procepe [2, 47 i 87], slika 3.7 a). Kao rezultat toga, jačina magnetskog polja u procepu je manja nego što se očekuje.



Slika 3.7. Magnetski fluks u jezgru sa procepom, [87]:

a) rasipanje magnetskog fluksa u procepu,

b) poprečni presek jezgra i efektivna površina procepa

Ukoliko bi se efekat rasipanja magnetskog fluksa u procepu uzimao u obzir prilikom procesa projektovanja npr. MR kočnice kao primera jednostavnog magnetskog kola, mogla bi se u obzir uzeti efektivna površina procepa, A'_{MR} , koja je veća od površine poprečnog preseka jezgra na mestu prelaska na procep, A_{MR} , slika 3.7 b). Ipak, sam efekat rasipanja magnetskog fluksa u procepu zavisi prvenstveno od vrste materijala u procepu, a potom i od veličine samog procepa, g_{MR} . Što je veličina procepa manja, manji je i efekat rasipanja.

Kod magnetskih kola koja imaju kružni poprečni presek, dobra aproksimacija rasipanja magnetskog fluksa se dobija ukoliko se na prečnik poprečnog preseka jezgra površine A_{MR} , doda dužina procepa, g_{MR} [47 i 87].

3.3. Određivanje magnetskih svojstava feromagnetskih materijala

Magnetska svojstva feromagnetskih materijala često nisu dostupna, te se moraju određivati merenjima. Merenja magnetskih svojstava su od posebnog tehničkog značaja, jer se dobijaju osnovni podaci neophodni za dalji proračun konstrukcija električnih mašina i uređaja. Ovakva merenja obuhvataju merenje magnetskih veličina poput: magnetskog fluksa, magnetske indukcije, magnetskog polja, permeabilnosti itd. Merenje se bazira na različitim metodama, među kojima je i određivanje magnetskih veličina pomoću napona kojeg izaziva promena magnetskog fluksa u namotaju.

U nastavku teksta predstavljen je jedan ovakav postupak merenja magnetskih veličina za dva različita uzorka čelika. Uzorci čelika su: Č.1221 i Č.3990, prema JUS.C.B.002, odnosno: C15E i 11SMn30, prema SRPS EN 10027-1:2015 i SRPS EN 10027-2:2015, respektivno. Merenje je podeljeno na dva dela. Prvo je predstavljen postupak snimanja dinamičke histerezisne petlje osciloskopom, a potom i postupak određivanja krive prvobitnog magnetisanja balističkim galvanometrom. Čelici C15E i 11SMn30 odabrani su na osnovu njihove približne hemijske sličnosti sa čelikom AISI 1018, često korišćenim za izradu MR kočnica, ali i komercijalne pristupačnosti [2 i 111]. Poređenje hemijskih sastava čelika dato je u tabeli 3.3. a parametri mernih transformatora dati su u tabeli 3.4.

Tabela 3.3. Poređenje hemijskog sastava čelika AISI 1018 sa C15E i 11SMn30, [121 i 122]

	Procentualna zastupljenost hemijskih elemenata				
	C	Si	Mn	S	P
<i>AISI 1018</i>	0,15 – 0,18	0,15 – 0,30	0,60 – 0,90	0,05 _{max}	0,04 _{max}
<i>C15E</i>	0,12 – 0,18	0,15 – 0,35	0,3 – 0,6	0,035	0,035
<i>11SMn30</i>	0,1 – 0,15	0,07 _{max}	0,70 – 1,00	0,12 _{max}	0,26 – 0,32

Tabela 3.4. Parametri torusa uzoraka C15E i 11SMn30

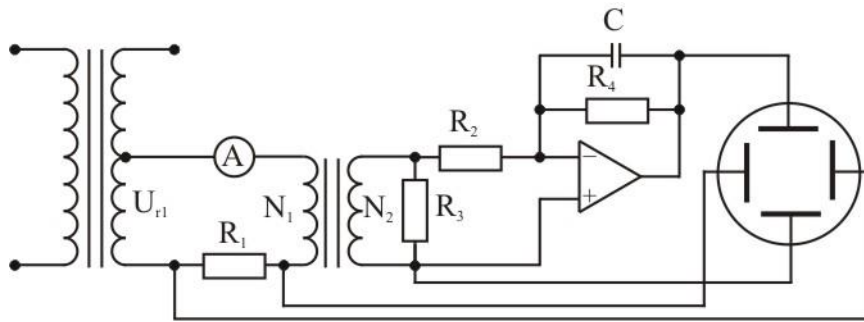
Parameter	Vrednost
Unutrašnji poluprečnik torusa, mm	14,75
Spoljašnji poluprečnik torusa, mm	17,25
Debljina torusa, mm	2,5
Srednji poluprečnik, mm	16
Obim, mm	109,9
Dužina srednje linije torusa, mm	100,48
Broj zavojava primara, -	600
Broj zavojava sekundara, -	60

Oba uzorka čelika formirana su u obliku tankog torusa i na oba je namotan određen broj zavojava, lakiranog bakarnog provodnika, primara i sekundara. Ovim postupkom formirani su tzv. merni transformatori. Detalji postavke eksperimenata dati su u nastavku ovog dela rada, dok su rezultati svih merenja predstavljeni u poglavlju 7.

3.3.1. Snimanje histerezisne petlje

Osciloskopom je moguće snimiti dinamičku histerezisnu petlju, upotrebom jednostavnog mernog sklopa. Šema sklopa, namenjenog za snimanje dinamičke histerezisne petlje, data je na slici 3.8. Primarni namotaj, sa N_1 zavojava (videti i sliku 3.11), namotan je na uzorak čelika i preko poznate otpornosti, R_1 , priključen na naizmenični napon. Na sekundarni namotaj, sa N_2 zavojava, priključeni su serijski spojeni otpornik R_2 i kondenzator, C . Pad napona, u_{R_1} , na otporniku, R_1 , vodi se na pločice osciloskopa za horizontalni otklon.

Da bi operacioni pojačavač radio kao linearni pojačavač pojačanje pojačavača se mora značajno smanjiti. To se postiže uvođenjem negativne povratne sprege, R_4 , odnosno vraćanjem dela izlaznog napona na invertujući ulaz. Otpornik R_3 ima ulogu kompenzacije ulazne otpornosti.



Slika 3.8. Šema uređaja za snimanje dinamičke histerezisne krive, [40]

Otklon će, dakle, biti proporcionalan struji magnetisanja i_1 jer je:

$$U_{R_1} = R_1 \cdot i_1. \quad (3.23)$$

U zatvorenom magnetskom kolu, kakav je prstenasti uzorak, jačina magnetskog polja proporcionalana je struji magnetisanja, jer je tada:

$$H = N_1 \cdot \frac{i_1}{l_{sr}}. \quad (3.24)$$

gde je l_{sr} – dužina ose torusnog uzorka. Horizontalni otklon svetlosnog snopa osciloskopa, srazmeran je jačini magnetskog polja u uzorku:

$$U_{R_1} = \frac{R_1 \cdot l_{sr}}{N_1} \cdot H = k_H \cdot H. \quad (3.25)$$

Pad napona na kondenzatoru C dovodi se na pločice osciloskopa za vertikalni otklon. Pri tom se odabere da je $R_2 \gg \frac{1}{C \cdot \omega}$, gde je ω – frekvencija (kružna učestanost), pa se u sekundaru uspostavlja struja intenziteta:

$$i_2 \approx \frac{e_2}{R_2}. \quad (3.26)$$

gde je e_2 – indukovani napon.

Kod uzorka, čiji je efektivna površina poprečnog preseka, S , u sekundaru se indukuje napon:

$$e_2 = -N_2 \cdot S \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (3.27)$$

i uspostavlja struja jačine:

$$i_2 = -\frac{N_2 \cdot S}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (3.28)$$

Napon na kondenzatoru C je $u_c = \frac{1}{C} \cdot \int i_2 \cdot dt$. Uvrštanjem u prethodni izraz, dobijamo da je pad napona na kondenzatoru, a time i vertikalni otklon osciloskopa, proporcionalan magnetskoj indukciji [40]:

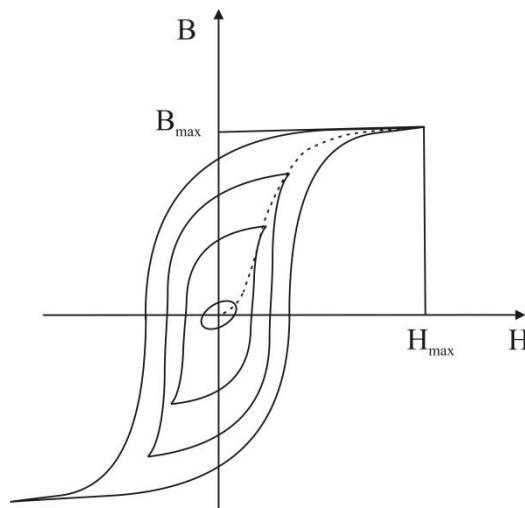
$$u_c = -\frac{N_2 \cdot S}{R_2 \cdot C} \cdot B = k_B \cdot B. \quad (3.29)$$

Histerezisne petlje čine skup parova vrednosti intenziteta vektora magnetskog polja i magnetske indukcije i B :

$$H = \frac{U_{R1}}{k_H}. \quad (3.30)$$

$$B = \frac{u_C}{k_B}. \quad (3.31)$$

Da bi se snimila kriva normalnog magnetisanja, neophodno je snimiti više histerezisnih petlji, za različite vrednosti jačine struje primara i zatim povezati vrhove tih histerezisnih petlji, slika 3.9.



Slika 3.9. Familija histerezisnih petlji, spajanje vrhova, [123]

Zbog niskog napona napajanja mernog transformatora i niskih napona dobijenih na izlazu iz integratora, snimanje histerezisne petlje pomoću osciloskopa okarakterisano je znatnom količinom šuma. Taj šum delimično je moguće filtrirati prilikom merenja, ali se ostatak mora eliminisati odgovarajućim numeričkim postupkom, [123].

3.3.2. Kriva prvobitnog magnetisanja

Za snimanje krive prvobitnog magnetisanja, u mernoj praksi postoji mnoštvo metoda i uređaja. Razlog tome su, prvenstveno, velike razlike u svojstvima upotrebljivanih magnetskih materijala. Neke od tih metoda i uređaja su: Hopkinsov jaram, Koepselov aparat, Gumlich-ova metoda, balistička metoda itd. [40]. Svaki pomenuti postupak koristi različite veličine i oblike uzorka magnetskog materijala. Ukoliko je uzorak torusnog oblika, balistička metoda jedan je od izbora za snimanje krive prvog magnetisanja. U nastavku je predstavljena ova metoda.

Pod krivom prvog magnetisanja se podrazumeva kriva prema kojoj vrednost magnetske indukcije, potpuno razmagnetisanog uzorka, raste pri postepenoj promeni magnetskog polja od 0 do njene gornje granice. Merenje se sprovodi prema šemi predstavljenoj na slici 3.10. Kao i kod postupka snimanja dinamičke histerezisne petlje, i u ovom slučaju koristi se merni transformator sa N_1 i N_2 zavojaka na primaru i sekundaru, respektivno. Primarni namotaj mernog transformatora je preko kombinacije otpornika R_1 , R_2 , R_3 ..., itd. priključen na jednosmerni izvor napajanja. Kada su svi prekidači, P_1 , P_2 , P_3 ..., itd. u otvorenom položaju, nema struje u primaru. Ukoliko se prekidači redom uključuju, kroz primar se postepeno uspostavlja sve veća struja. Odgovarajuće vrednosti magnetskog polja se određuju prema (3.24). Stepenasta promena magnetskog polja izaziva stepenaste promene vrednosti magnetske indukcije u uzorku za iznose ΔB_1 , ΔB_2 , ΔB_3 ..., itd. što će izazvati balističke otklone galvanometra priključenog na sekundar, prema:

$$\Delta B_1 = \frac{K_B}{N_2 \cdot S} \cdot \alpha_i. \quad (3.32)$$

gde su: K_B i α_i balistička konstanta galvanometra za merenje naponskih udara i balistički otklon galvanometra, respektivno. Znajući vrednosti magnetske indukcije ΔB_1 , ΔB_2 , ΔB_3 ..., i vrednosti magnetskog polja H_1 , H_2 , H_3 ..., moguće je odrediti krivu prvobitnog magnetisanja kako je to predstavljeno na slici 3.11 [40]. Jedna postavka eksperimenta snimanja krive prvobitnog magnetisanja sa osvrtom na praktične probleme, predstavljena je u [124].

Postupak određivanja vrednosti balističke konstante

Prilikom praktične realizacije merenja balističkom metodom, neophodno je znati vrednost balističke konstante. Za određivanje njene vrednosti Iskrenović u [125] navodi da se koristi električno kolo predstavljeno na slici 3.12.

Kratki impulsi električne struje kroz balistički galvanometar BG realizuju se posredstvom induktivno spregnutih zavojnica L_1 i L_2 . Pri otvorenom prekidaču P_2 jačinu struje I_1 kroz primarno kolo i zavojnicu L_1 treba podesiti na željenu vrednost. Zatim treba apodesiti vrednost otpora R_B i prekidačem P_2 zatvoriti sekundarno kolo. Otvaranjem prekidača P_1 prekida se primarno kolo i struja I_1 . U tom trenutku menja se magnetski fluks kroz obe zavojnice. Promena magnetskog fluksa kroz zavojnicu L_2 na njenim krajevima indukuje elektromotornu silu e_2 .

$$e_2 = \frac{d\phi_{l2}}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt}. \quad (3.33)$$

gde je sa ϕ_{12} označen magnetski fluks kroz drugu zavojnicu a sa M koeficijent međusobne indukcije zavojnica L_1 i L_2 . Usled delovanja elektromotorne sile e_2 kroz sekundarno kole će teći struja i_2 .

$$i_2 = \frac{e_2}{R_B + R_g + R_{L2}} = - \frac{M}{R_B + R_g + R_{L2}} \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad (3.34)$$

Struja i_2 se uspostavlja samo dok se menja jačina struje I_1 , tj. vrlo kratak interval vremena T_{imp} posle otvaranja prekidača P_2 . Za to vreme kroz galvanometar protekne naelektrisanje q :

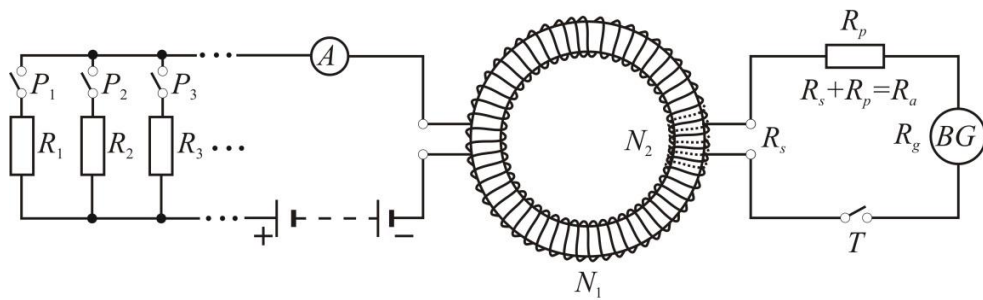
$$q = \int_0^{T_{imp}} i_2 dt = - \frac{M}{R_B + R_g + R_{L2}} \int_0^{T_{imp}} \frac{dI_1}{dt} dt = - \frac{M}{R_B + R_g + R_{L2}} (I_1) \Big|_0^{T_{imp}} = \frac{M \cdot I_1}{R_B + R_g + R_{L2}} \quad (3.35)$$

Prvo, maksimalno skretanje balističkog svetlosnog snopa je:

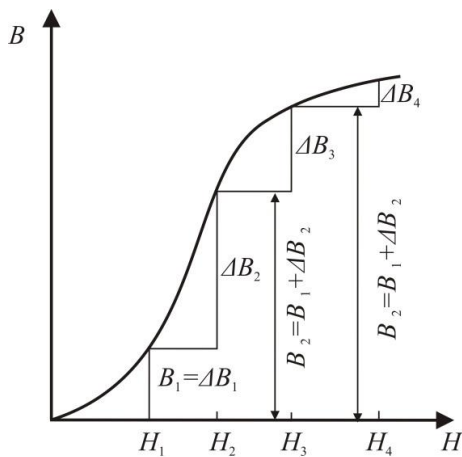
$$\varphi_{max} = \frac{I}{K_B} \cdot q = \frac{I}{K_B} \cdot \frac{M \cdot I_1}{R_B + R_g + R_{L2}} \quad (3.36)$$

odakle sledi da je tražena balistička konstanta:

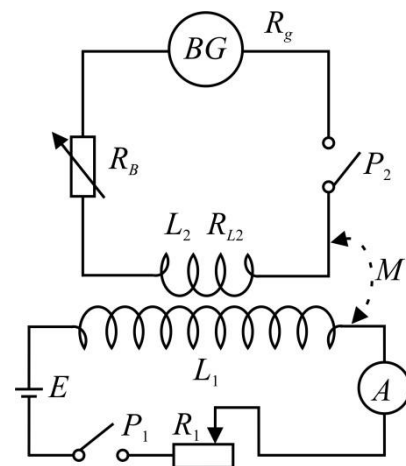
$$K_B = \frac{I}{\varphi_{max}} \cdot \frac{M \cdot I_1}{R_B + R_g + R_{L2}} \quad (3.37)$$



Slika 3.10. Šema uređaja za snimanje krive prvobitnog magnetisanja balističkom metodom, [40]



Slika 3.11. Konstrukcija krive prvobitnog magnetisanja, [40]



Slika 3.12. Šema električnog kola za određivanje vrednosti balističke konstante, [125]

3.4. Analiza magnetskog kola metodom konačnih elemenata

U najvećem broju slučajeva, kada analizirana struktura ima složenu geometriju, kada je složen uticaj na nju i kada je struktura sačinjena od različitih vrsta materijala, nije moguće naći rešenje promene neke veličine u analitičkom obliku. Analitičko rešenje podrazumeva dobijanje analitičkih izraza za računanje određenih parametara strukture na različitim mestima. Za dobijanje takvih podataka potrebno je rešavanje diferencijalnih ili parcijalnih diferencijalnih jednačina. Iz ovog razloga, koriste se različite numeričke metode koje daju konkretne odgovore na probleme, koje je teško ili nemoguće rešiti analitičkim putem. Metod konačnih elemenata – MKE predstavlja numerički postupak rešavanja inženjerskih problema. Ovim metodom mogu se vršiti razne analize struktura, računati promene temperature, kretanje fluida, raspodele polja itd. Sa druge strane, analiza konačnim elementima predstavlja primenu MKE za rešavanje određene vrste problema.

Prvi radovi iz oblasti MKE pojavili su se četrdesetih godina prošloga veka. Hrennikoff je u [126] rešavao probleme u oblasti strukturne analize i naponske analize čvrstog tela. Prve ideje o primeni MKE u analizi elektromagnetskih polja potiču sa kraja šezdesetih godina prošlog veka i vezane su za rad Winslow-a [127]. Od tog vremena MKE, se uspešno primenjuje na različite probleme vezane za analizu elektrostatičkih i magnetostatičkih polja, vrtložnih struja, elektromagnetskih rasipanja i fenomene talasnog prostiranja. Sekulović, u svojoj knjizi [128], daje osnove iz ove oblasti ali i detaljan pregled različitih vidova MKE i njihovu praktičnu primenu. Prema Sekuloviću, metoda konačnih elemenata je metoda koja se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma, odnosno domena. Formiranjem diskretnog modela, stvara se osmišljena, usklađena i povezana grupa konačnih elemenata, kojom je opisan kontinuum. Suština aproksimacije kontinuuma po metodu konačnih elemenata, sastoji se u sledećem:

- Razmatrani domen kontinuuma, pomoću zamišljenih linija i površi, deli se na određeni broj poddomena konačnih dimenzija. Pojedini poddomeni nazivaju se konačni elementi, a njihov skup za ceo domen – sistem ili mreža konačnih elemenata.
- Pretpostavlja se da su konačni elementi međusobno povezani u konačnom broju tačaka, koje se usvajaju na konturi elementa. Te tačke nazivaju se čvorne tačke ili čvorovi.
- Stanje u svakom konačnom elementu (npr. raspodela polja) opisuje se pomoću interpolacionih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima, koji predstavljaju osnove nepoznate veličine u metodu konačnih elemenata.
- Za analizu sistema konačnih elemenata važe principi koji važe za klasične diskretne sisteme.

Problemi u analizi elektromagnetskih polja zahtevaju rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina u nekom domenu, kako bi se izračunala raspodela polja [129].

Za potrebe ovog istraživanja izvršeno je modelovanje dva prototipa MR kočnice MKE bazirane na simulaciji raspodele magnetskog polja kroz tela kočnica. Ceo proces je obavljen u programskom paketu *Comsol Multiphysics* u okviru *AC/DC* modula. Zbog osne simetrije tela MR kočnice postojala je mogućnost modelovanja redukovanog modela, primenom *2D Magnetic Field* interfejsa. Simulacija je izvedena u nekoliko koraka. Prvo je izvršeno pojednostavljenje posmatrane strukture MR kočnice. Iz daljeg razmatranja su uklonjeni svi elementi MR kočnice koji nemaju uticaja na raspodelu magnetskog polja. Zatim je svaki element MR kočnice geometrijski predstavljen u 2D prikazu. Potom su svakom elementu dodeljeni parametri odgovarajućeg materijala. Nemagnetski materijali su odabrani iz *Comsol*-ove baze materijala, čime su im automatski dodeljeni svi relevantni parametri. Feromagnetski materijali formirani su prema podacima proizvođača (MR tečnost) ili na osnovu rezultata prethodno izvršenih merenja magnetskih svojstava (C15E). Detalji formiranja modela u *Comsol*-u dati su u prilogu 10.3, a rezultati su prezentovani u poglavlju 7.3.

4. Konstrukcija i svojstva magnetoreoloških kočnica

Magnetoreološka kočnica predstavlja elektromehanički uređaj u kom se, prilikom kočenja, kinetička energija rotora transformiše u toplotnu energiju. Osnovni delovi MR kočnice su: rotor, stator (kućište) i namotaj. Raspored i međusobna veza ovih delova može varirati, pa se prema tome najčešće i vrši njihova podela. U nastavku teksta predstavljeni su glavni tipovi MR kočnica. Akcenat ovog dela rada stavljen je na konstrukciju MR kočnice i analitičko određivanje kočnog momenta. Na kraju ovog poglavlja, predstavljeno je nekoliko načina merenja vrednosti kočnog momenta i dva preliminarna prototipa MR kočnice.

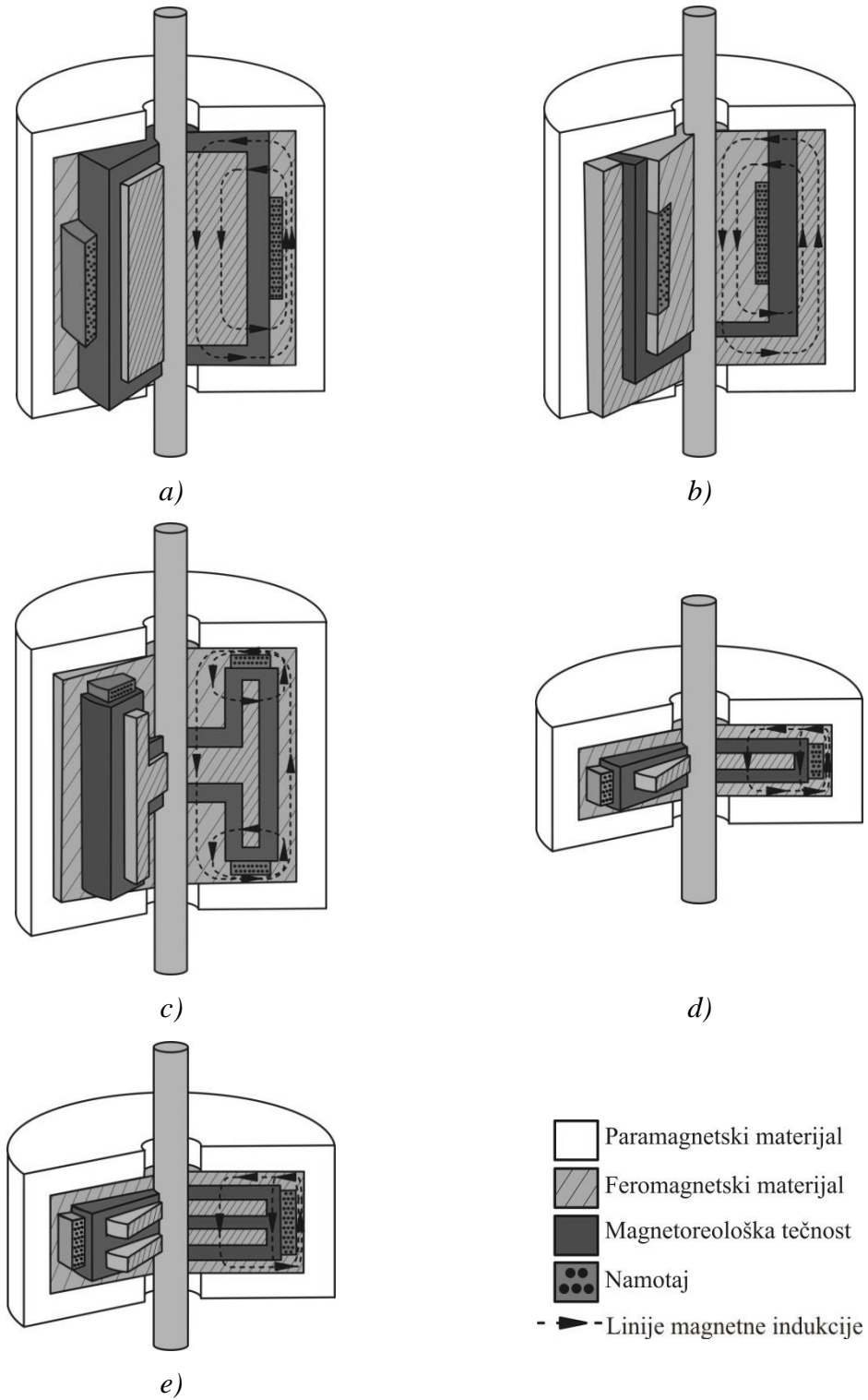
Zajedničko svojstvo za svaki tip MR kočnice je da se MR tečnost nalazi između dve paralelne površine, od kojih je jedna pomičan deo, a druga – nepomičan deo MR kočnice. Cilj projektovanja MR kočnice, sa magnetskog aspekta, je da magnetsko polje uvek deluje na što veći deo zapremine MR tečnosti, a da njegov vektor pri tom budu upravne na površine pomičnog i nepomičnog dela MR kočnice. Na ovaj način, ostvaruje se maksimalni MR efekat, jer ukupna dužina puta raspodele magnetskog polja kroz MR tečnost je minimalna a jačina magnetskog polja maksimalna.

4.1. Podela magnetoreoloških kočnica prema obliku konstrukcije

Kočni kapacitet je, svakako, najznačajnije svojstvo svakog tipa MR kočnice. Za kočni kapacitet se može reći da predstavlja najveću moguću vrednost kočnog momenta koji se, za datu konstrukciju, može ostvariti. Pored najveće vrednosti kočnog momenta, značajni pokazatelji za MR kočnice su i moment inercije rotora, maksimalna električna snaga kočenja, prečnik rotora, zapremina, potrošnja električne energije itd. U ovom delu rada detaljnije su predstavljena prva tri pokazatelja: kočni moment, moment inercije rotora i maksimalna električna snaga kočenja. Za svaki tip MR kočnice predstavljeni su analitički izrazi za ove parametre, dok je na kraju ovog dela, dato i njihovo tabelarno poređenje.

Na slici 4.1. prikazane su ilustracije pet najčešćih tipova MR kočnica. Radi lakšeg uočavanja međusobnih razlika, MR kočnice su ilustrovane na uniforman način, pa tako, svaki tip MR kočnice ima kućište od paramagnetskog materijala, a statorski i rotorski sklopovi su od istog feromagnetskog materijala. Namotaj je kod svih tipova postavljen unutar kućišta, osnosimetrično u odnosu na rotorski sklop. Kod svakog predstavljenog tipa MR kočnice, rotorski sklop se sastoji od vratila i elementa odgovarajućeg oblika zaduženog za generisanje kočnog momenta. Za svaki tip je karakteristično da vratilo aksijalno prolazi kroz taj element, statorski sklop i kućište. Oblik ovog elementa rotorskog sklopa varira od tipa do tipa, pa tako imamo oblike: cilindra, šupljeg cilindra, diska itd., slika 4.1.

Pretpostavka za svaki tip MR kočnice sa slike 4.1. je da je namotaj tako dimenzionisan da je raspodela magnetskog polja uniformna kroz ukupnu zapreminu MR tečnosti. Linije magnetske indukcije predstavljene su tako da prolaze kroz karakteristične oblasti MR kočnice, oblasti u kojima se generiše kočni moment, ali oblasti u kojima uticaj magnetskog polja na MR tečnost ne doprinosi generisanju kočnog momenta, slika 4.1 a), b), d) i e). Razlog tome leži u konstrukcijskim ograničenjima MR kočnice.



Slika 4.1. Ilustrovani primeri tipova magnetoreoloških kočnica:
 a) doboš, b) obrnuti doboš, c) T-rotor, d) disk, e) multidisk

4.1.1. Magnetoreološke kočnice tipa doboš i obrnuti doboš

U slučaju MR kočnice tipa doboš, rotorski sklop se sastoji od vratila koje aksijalno prolazi kroz cilindar. Ovo je jedno od jednostavnijih konstrukcijskih rešenja rotorskog sklopa. Ilustracije preseka modela ovog tipa kočnice date su na slikama 4.1 a) i 4.2 a). Osnovna svojstva MR kočnice tipa doboš su: velika paralelna površina između cilindra i unutrašnjosti statorskog sklopa, jednostavnost izrade i velika masa rotora. Raspodela magnetskog polja u konstrukciji MR kočnice tipa doboš, predstavljena je na slici 4.1 a).

Nedostatak ovakvog tipa MR kočnice je što u zavisnosti od parametara namotaja mogu postojati i delovi zapremine MR tečnosti, raspoređene po omotaču cilindra, a u oblasti bliskim bazama cilindra, koji nisu dovoljno dobro pokriveni magnetskim poljem. Zbog toga je često potrebno predimenzionisati parametre namotaja ili izvršiti naknadnu optimizaciju parametara konstrukcije MR kočnice. Ovim postupcima se ili smanjuje efikasnost sistema ili menja oblik konstrukcije u pravcu nekog drugog tipa MR kočnice. Takođe, velika zapremina same kočnice, odnosno zapremina feromagnetskog materijala konstrukcije, utiče na raspodelu magnetskog polja po konstrukciji MR kočnice, a posebno u prethodno pomenutim oblastima, koje ne doprinose generisanju kočnog momenta. Ovakav efekat razučivanja magnetskog polja dovodi do smanjenja potencijala magnetskog polja na MR tečnost u oblastima u kojima se generiše kočni moment. Ovaj efekat direktno vodi umanjenju potencijala kočnog kapaciteta MR kočnice. Zbog velike mase rotorskog sklopa, MR doboš kočnica se odlikuje i velikim momentom inercije, što može predstavljati nedostatak u većini aplikacija [48, 89, 130, 131 i 132].

Kako bi se smanjila masa rotora, a ujedno povećala i aktivna površina u kontaktu sa MR tečnošću, uvodi se konstrukcija obrnutog doboša, slika 4.1 b). Izrada ovakve konstrukcije je nešto zahtevnija u poređenju sa izradom konstrukcije doboš kočnice. Ovaj tip MR kočnice posebno je pogodan kod aplikacija kod kojih se vratilo ne obrće [131 i 133].

Oba tipa MR kočnica, doboš i obrnuti doboš, mogu se predstaviti istim analitičkim izrazom za kočni moment. Krenuvši od izraza 2.5, datog u obliku:

$$\tau = \tau_B + \eta \cdot \frac{\omega \cdot r}{g_{MR}} \quad (4.1)$$

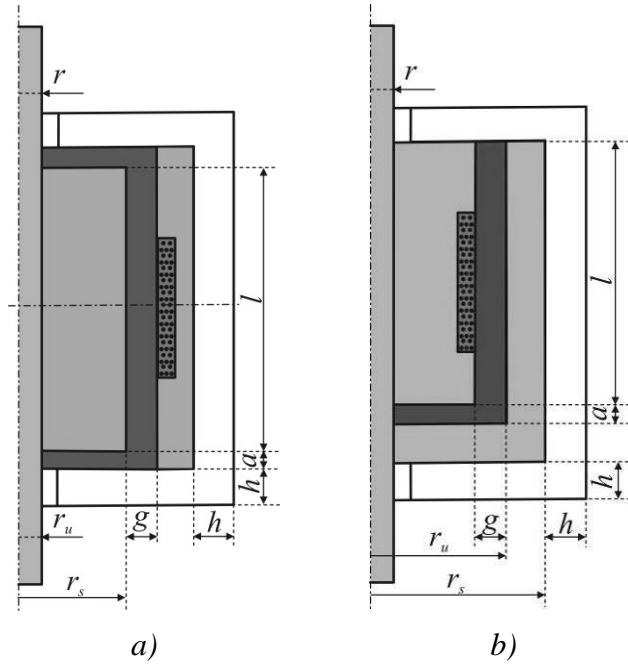
gde su sa ω i r , predstavljeni ugaona brzina i poluprečnik rotora, respektivno. Gradijent brzine $\dot{\gamma}$ iz jednačine 2.5 u ovom slučaju dat je u novom analitičkom obliku a prema [134], pošto je veličina poluprečnika rotora daleko veća od veličine procepa sa MR tečnošću. Posmatrajući osnovnu

jednačinu (4.1), može se reći da se kočni moment sastoji od indukovane, τ_B , i viskozne, $\eta \cdot \frac{\omega \cdot r}{g_{MR}}$

komponente. Integraljenjem iste jednačine, u granicama od r_s do r_u , slika 4.2 a) i b), dobija se da je kočni moment MR doboš kočnice i obrnute doboš kočnice jednak:

$$dM = 2 \cdot \pi \cdot N \cdot \tau \cdot r^2 dr \quad (4.2)$$

$$M = M_i + M_v = 2 \cdot \pi \cdot N \int_{r_u}^{r_s} \tau \cdot r^2 dr = 4 \cdot \pi \cdot l \cdot \left(\tau_B \cdot r_s^2 + \eta \cdot \frac{\omega}{g_{MR}} \cdot r_s^3 \right)$$



Slika 4.2. Ilustracija preseka modela magnetoreološke kočnice tipa:

a) doboš, b) obrnuti doboš

r – poluprečnik vratila, a – debljina sloja MR tečnosti, h – debljina zida kućišta MR kočnice, l – ukupna aktivna dužina sloja MR tečnosti

gde su: N , M_i i M_v – broj aktivnih površina rotora i indukovana i viskozna komponenta kočnog momenta, respektivno. Sa l je predstavljena ukupna dužina omotača (visina) cilindra rotorskog sklopa prekrivenog MR tečnošću, a sa r_s – spoljašnji poluprečnik cilindra rotorskog sklopa. U jednačini 4.2 vrednost r_u - unutrašnji poluprečnik cilindra rotorskog sklopa je zbog svoje male vrednosti zanemareno.

Oba tipa MR kočnice imaju cilindričan oblik rotorskog sklopa zapremine, V , koji je u potpunosti sačinjen od homogenog feromagnetskog materijala specifične gustine, ρ_m . Masa cilindra se jednostavno određuje kao: $m = V \cdot \rho_m$, a moment inercije u generalnom obliku je dat kao:

$$J = \int_0^m r^2 \cdot dm. \quad (4.3)$$

Sada se moment inercije, za cilindrični element rotorskog sklopa, mase m , može predstaviti kao:

$$J = \frac{m \cdot r_s^2}{2}. \quad (4.4)$$

odnosno za obrnuti doboš tzv. šuplji cilindar sa bazom mase m :

$$J = \frac{m}{2} \cdot \left((r_s^2 + r_u^2) + r_s^2 \right). \quad (4.5)$$

Poznavajući ukupnu dužinu, specifičnu otpornost i prečnik lakiranog bakarnog provodnika, zatim broj zavojava namotaja i geometrijske parametre konstrukcije MR kočnice, moguće je

odrediti vrednost maksimalne električne snage kočenja MR kočnice. Ukoliko električnu otpornost namotaja predstavimo u obliku [2]:

$$R = \frac{\rho_o \cdot L}{S} \quad (4.6)$$

gde su ρ_o , L i S , specifična otpornost materijala, ukupna dužina i površina poprečnog preseka provodnika, respektivno.

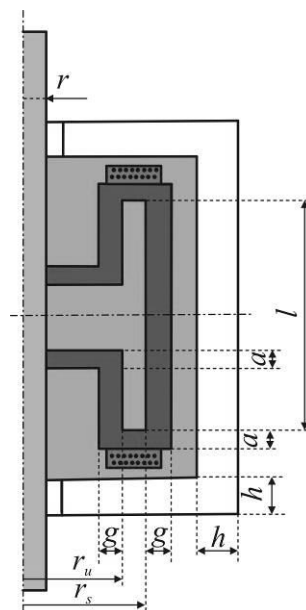
Maksimalna električna snaga kočenja MR kočnice se može izraziti kao:

$$P = R \cdot I^2 = \frac{\rho_o \cdot L}{d^2 \cdot \pi} \cdot I^2 \quad (4.7)$$

gde su d i I – poluprečnik provodnika i intenzitet upravljačke struje namotaja, respektivno.

4.1.2. Magnetoreološka kočnica tipa T-rotor

Rotor MR kočnice tipa T-rotor konstrukcijski je vrlo sličan konstrukciji obrnutog doboša, s tom razlikom što je sada baza šupljeg cilindra pomerena na sredinu tog cilindra, a novi poprečni presek sada podseća na oblik slova T. Ovo je kompleksnije konstruktivno rešenje, nego što je to slučaj kod konstrukcija doboš i obrnuti doboš. Ilustracija preseka modela T-rotor kočnice je data na slikama 4.1 c) i 4.3. Osnovne karakteristike MR T-rotor kočnice su velika dvostrana paralelna površina između rotorskog i statorskog sklopa, smanjena masa i povećana kompleksnost konstrukcije. I u ovom slučaju, linije magnetskog polja prolaze kroz MR tečnost normalno u odnosu na aktivne površine, dok je oblast sa MR tečnošću na koju se slabo deluje ili se ni ne deluje magnetskim poljem – mala, slika 4.1 a). Nedostatak ovakvog rešenja je veći broj namotaja, u ovom slučaju dva, (paralelna) i povećana kompleksnost izrade. Ovaj tip kočnice se ređe sreće u literaturi [48, 135 i 136].



Slika 4.3. Ilustracija preseka modela magnetoreološke kočnice tipa T rotor

Prilagođeni analitički izraz kočnog momenta MR T-rotor kočnice dat je u obliku [2]:

$$M = 8 \cdot \pi \cdot l \cdot \left(\tau_B \cdot r_s^2 + \eta \cdot \frac{\omega}{g_{MR}} \cdot r_s^3 \right). \quad (4.8)$$

Izrazi za moment inercije i maksimalnu električnu snagu kočenja mogu se predstaviti kao:

$$J = \frac{m}{2} \cdot \left((r_s^2 + r_u^2) + r_s^2 \right). \quad (4.9)$$

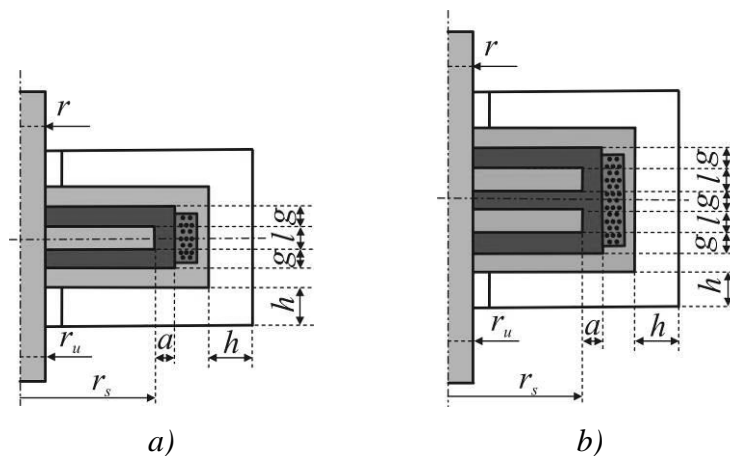
$$P = 2 \cdot R \cdot I^2 = 2 \cdot \frac{\rho_o \cdot L}{d^2 \cdot \pi} \cdot I^2. \quad (4.10)$$

Izrazi za moment inercije obrnutog doboša i T rotora su identični, (4.5) i (4.9), što se objašnjava suštinskom sličnošću oblika rotora. Kod obrnutog doboša imamo šuplji cilindar zatvoren bazom na jednom kraju, dok se kod T rotora ta baza nalazi na polovini ukupne dužine šupljeg cilindra. Razlika u izrazima za maksimalnu električnu snagu kočenja u odnosu na prethodna dva tipa se objašnjava postojanjem dva namotaja, u serijskoj ili paralelnoj vezi.

4.1.3. Magnetoreološka kočnica tipa disk i multidisk

Rotorski sklop MR kočnice tipa disk sastoji se od vratila koje aksijalno prolazi kroz disk. Namotaj ovog tipa MR kočnice postavljen je u ili na statorskom sklopu, koaksijalno u odnosu na disk. Ovakva konstrukcija se smatra najjednostavnijom i najlakšom za izradu [16, 20, 28, 33, 34 i 137].

Ilustracije preseka modela MR disk kočnice su date na slikama 4.1 d) i 4.4 a). Osnovna svojstva ovog tipa MR kočnice su: velika dvostrana paralelna kontaktna površina, najmanja masa rotora među svim tipovima MR kočnica, jednostavnost izrade i postizanja tačnih vrednosti mera u procesu montaže. Raspodela linija magnetske indukcije, kroz MR tečnost, pravcem je paralelnim sa osom vratila te prolaze kroz disk u oblasti njegovih baza. Linije magnetske indukcije su normalne na te površine i odgovarajuće površine statorskog sklopa. Oblast sa manjom količinom MR tečnosti, na koju magnetska indukcija deluje, ali ne doprinosi kočnom momentu, nalazi se u oblasti između statora (namotaja) i omotača diska, u tzv. temenoj oblasti diska, slika 4.1 d).



Slika 4.4. Ilustracija preseka modela magnetoreološke kočnice tipa: a) disk, b) multidisk

Nedostatak ovakvog konstrukcijskog rešenja MR kočnice je mali prostor za smeštanje namotaja. Ovo može biti ograničavajući konstrukcijski faktor sa aspekta ostvarivanja što većeg kočnog momenta. Rešava se povećanjem gabarita konstrukcije, posebno ukupne dužine MR kočnice. Povećani prostor se tada, pored smeštaja većeg namotaja, može iskoristiti za smeštaj dodatnih diskova na istom vratilu. Ovakva, nova konstrukcija naziva se MR multidisk kočnica. Na ovaj način se u određenoj meri povećava ukupna masa kočnice, jer je, pored dodatnih diskova, neophodno postaviti i dodatne nepomične delove statorskog sklopa, slike 4.1 e) i 4.4 b). Takođe, na ovaj način se stvara i veći broj procepa se MR tečnošću, čime se povećava ukupna zapremina MR tečnosti, a samim tim direktno se utiče na povećanje kočnog momenta. Primeri primene MR multidisk kočnice mogu se naći u ortopedskim pomagalicama [15 i 138], i u automobilskoj industriji [106 i 139], itd.

Analitički izrazi kočnog momenta, momenta inercije i maksimalne električne snage kočenja, za oba tipa, dati su u obliku [2]:

$$M = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \tau_B \cdot (R_s^3 - R_u^3) + \frac{\pi \cdot \eta \cdot \omega}{g} \cdot (R_s^4 - R_u^4). \quad (4.11)$$

$$J = \frac{m \cdot r_s^2}{2}. \quad (4.12)$$

$$P = R \cdot I^2 = \frac{\rho_o \cdot L_d}{d^2 \cdot \pi} \cdot I^2. \quad (4.13)$$

$$M = \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \tau_B \cdot (R_s^3 - R_u^3) + \frac{\pi \cdot \eta \cdot \omega}{g} \cdot (R_s^4 - R_u^4) \right) \cdot N_d. \quad (4.14)$$

$$J = \left(\frac{m \cdot r_s^2}{2} \right) \cdot N_d. \quad (4.15)$$

$$P = R \cdot I^2 = \frac{\rho_o \cdot L_{md}}{d^2 \cdot \pi} \cdot I^2. \quad (4.16)$$

gde su: N_d , L_d i L_{md} broj diskova i ukupne dužine provodnika u namotaju za disk i za multidisk tip MR kočnice, respektivno.

4.2. Merenje ukupnog kočnog momenta magnetoreološke kočnice

Posmatrano sa praktične strane merenja vrednosti ostvarenog momenta MR kočnice, pored indukovane i viskozne komponente, javlja se još jedna komponenta, tzv. frikciona komponenta. Dakle, ukupni kočni moment bilo kog tipa MR kočnice, sastoji se od tri komponente:

- indukovane komponente - M_i ,
- viskozne komponente - M_v i
- frikcione komponente - M_f ,

i može se predstaviti u obliku:

$$M = M_i + M_v + M_f. \quad (4.17)$$

Ovo važi za svaki tip MR kočnice. U ovom radu će se praviti jasna razlika između kočnog momenta, $M_i + M_v$, i ukupnog kočnog momenta, $M_i + M_v + M_f$.

Frikciona komponenta ukupnog kočnog momenta – UKM, M_f , zavisi isključivo od otpora nastalog trenjem među komponentama, kao npr. kod ležajeva i otpora nastalih upotrebom zaptivnih elemenata, a koji su u dodiru sa rotorskim sklopom kočnice. Vrednost M_f komponente UKM sporo se i malo menja tokom vremena, pa se za nju može reći da je praktično konstantne vrednosti. Vrednost komponente M_f najtačnije se može odrediti njenim direktnim merenjem, odnosno merenjem kočnog momenta MR kočnice, bez prisustva MR tečnosti i bez uticaja magnetskog polja. Vrednosti M_f komponente se mogu zanemariti tokom analiziranja doprinosa druge dve komponente UKM. Ipak, njen uticaj može biti od značaja u slučajevima merenja vrednosti UKM pri nižim brojevima obrtaja u kombinaciji sa manjim vrednostima upravljačke struje. Tada se vrednost ove komponente ne sme zanemariti, jer ona može činiti značajan deo izmerenih vrednosti UKM.

Viskozna komponenta, M_v , proporcionalna je otporu nastalom kretanjem elementa rotorskog sklopa, zaduženog za generisanje kočnog momenta (cilindar, šuplji cilindar, disk itd.), kroz MR tečnost, pri $H = 0$. Vrednost viskozne komponente se, pored analitičkog metoda, određuje i metodom direktnog merenja otpornog momenta MR kočnice koja u sebi sadrži odgovarajuću količinu MR tečnosti. Izmerene vrednosti otpornog momenta su, u stvari, su zbir frikcione i viskozne i mogu se zajednički označiti kao frikciono-viskozna suma UKM. Oduzimanjem vrednosti prethodno izmerene komponente M_f komponente od ove sume dobija se informacija o veličini M_v .

Indukovana komponenta, M_i , nastaje kao rezultat delovanja magnetskog polja na MR tečnost sadržanu u komornom prostoru, a njen doprinos vrednosti UKM proporcionalan je intenzitetu upravljačke struje, odnosno jačini magnetskog polja. Određivanje vrednosti M_i mernim putem obavlja se slično kao i za M_v , s tom razlikom što sada u zbir UKM ulaze i M_f i M_v i M_i . Kako bi se po izvršenom merenju UKM dobila informacija o veličini M_i , neophodno je oduzeti prethodno utvrđen zbir M_f i M_v .

Na vrednost UKM u određenoj meri negativno utiču i ostali konstruktivni parametri poput: preciznosti izrade elemenata, parametri namotaja, vrsta i kvalitet zaptivnih elemenata i ležajeva, stepen ispunjenosti MR kočnice MR tečnošću – pojava vazdušnih džepova u MR tečnosti, njena starost i stepen sleganja i zagrevanja. Kako bi se stvorili uslovi za ostvarivanje maksimalne vrednosti UKM, prethodno nabrojani parametri moraju biti izvedeni sa što je moguće većom tačnošću, odnosno njihov negativan uticaj mora se svesti na minimum.

4.2.1. Metodi merenja kočnog momenta magnetoreološke kočnice

Ispitivanje kočnih karakteristika MR kočnica je proces merenja vrednosti UKM i brzine odziva, a u zavisnosti od parametara poput: broja obrtaja vratila rotora, veličine procepa sa MR tečnošću, sastava MR tečnosti, temperature i intenziteta upravljačke struje. Pregledom literature [31, 84, 101 i 140], ustanovljeno je da postoji nekoliko koncepcija laboratorijskih uređaja koji se koriste za ovakva ispitivanja. Razlika u načinu merenja UKM predstavlja jedan od osnovnih kriterijuma za podelu, pa se tako metodi za ispitivanje kočnih svojstava MR kočnica mogu podeliti u dve osnovne grupe:

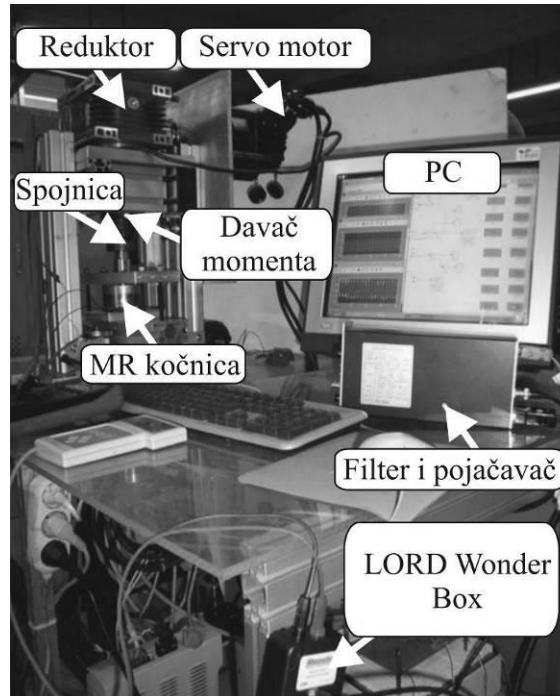
- direktni metod i
- indirektni metod merenja.

Razlika između direktnog i indirektnog metoda merenja vrednosti UKM ogleda se u tome što se kod direktnog metoda, vrednost UKM MR kočnice dobija sa davača momenta koji je direktno spojen na vratilo MR kočnice, slika 4.5 a) i b), dok se kod indirektnog metoda meri sila koja se sa kućišta (statora) MR kočnice polužnim putem prenosi na davač sile, slika 4.6 c). Kod indirektnog načina, sila se prenosi na davač sile polugom koja je jednim krajem konzolno spojena sa kućištem MR kočnice, a drugim oslonjena na davač sile.

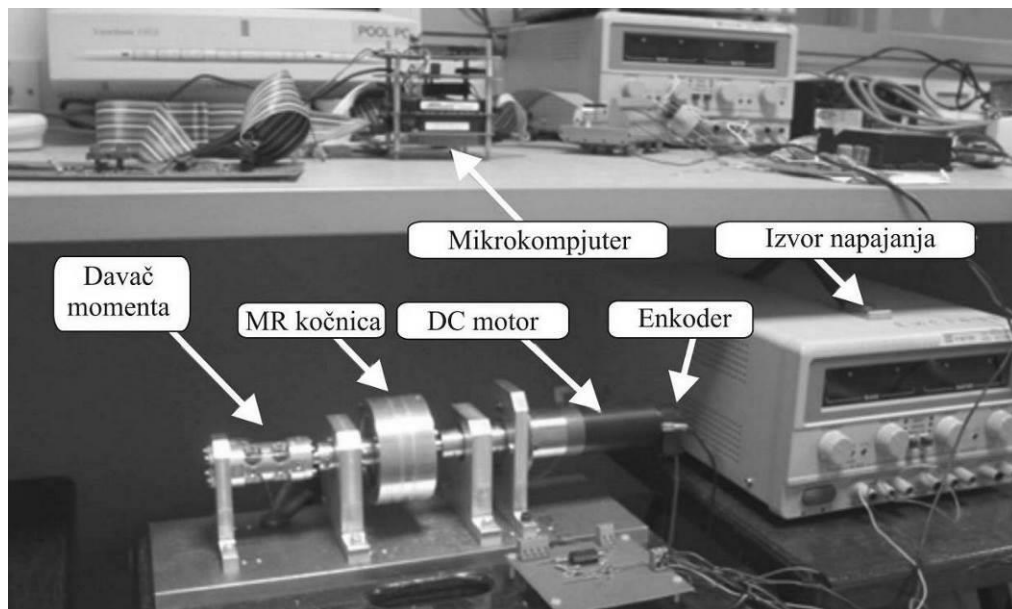
Pregled nekoliko primera laboratorijskih uređaja za merenje vrednosti UKM prikazani su na slikama 4.5 a) i b) i 4.6 a) i b). Pored ovih, u literaturi [141] se pominje još jedan metod merenja, čiji je primer laboratorijskog uređaja dat na slici 4.7. Ovo rešenje za merenje UKM predstavlja pojednostavljeni način direktnog merenja momenta, jer ne postoji potreba za nosećom konstrukcijom kakvu imaju ispitni stolovi.

Ukoliko se izuzme razlika u načinu akvizicije merenih vrednosti (vrednosti: upravljačke struje, UKM, broja obrtaja, temperature itd.) predstavljeni laboratorijski uređaji se bitno ne razlikuju prema konstrukciji. Svaki laboratorijski uređaj mora, pored MR kočnice, posedovati: elektromotorni pogon, noseću konstrukciju i merno akvizicionu opremu. Postavka osnovnih elemenata laboratorijskog uređaja je uvek linijskog tipa i nalazi se na nosećoj konstrukciji. Elektromotorni pogon spojen je sa vratilom MR kočnice, preko kojeg se pogonski moment dalje prenosi na sistem davača momenta, direktno ili indirektno. Na odgovarajućem mestu, smešten je i davač broja obrtaja. Ovakva konfiguracija predstavlja minimum, neophodan za uspešno merenje vrednosti UKM.

U nastavku teksta opisana je postavka laboratorijskih uređaja za merenje UKM kod nekoliko različitih prototipova MR kočnice, korišćenih u ovom istraživanju. Rezultati dobijeni tim merenjima koristili su se za dalji razvoj MR kočnica. Svi uspešno izrađeni prototipovi predstavljeni su u ovom radu.



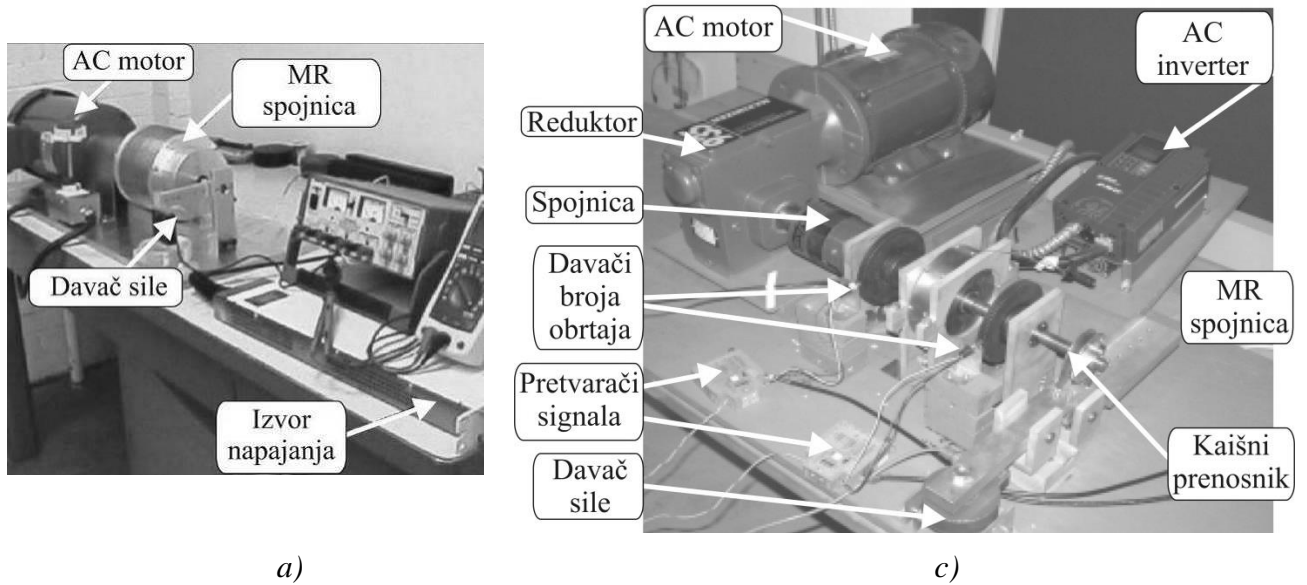
a)



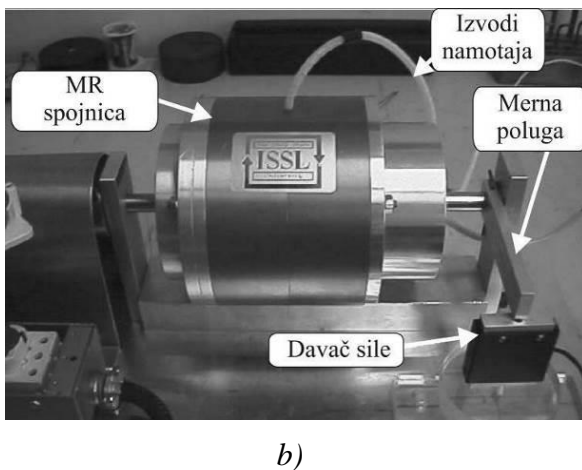
b)

Slika 4.5. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika magnetoreoloških kočnica – direktni način merenja kočnog momenta:

a) [31], b) [101]



Slika 4.6. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika magnetoreoloških kočnica, indirektni način merenja kočnog momenta: a) i b) [140] i c) [84]



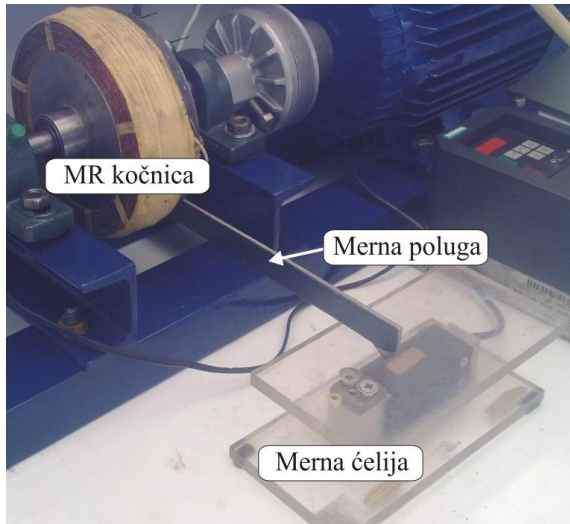
Slika 4.7. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika magnetoreoloških kočnica, pojednostavljeni način direktnog merenja kočnog momenta, [141]

4.2.2. Merenje reaktivnog kočnog momenta

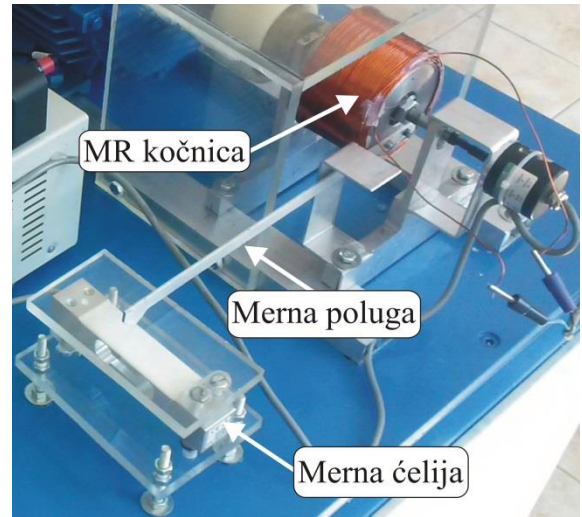
Tokom preliminarnih istraživanja, radova i merenja, došlo se do zaključka da postoje određene praktične prednosti indirektnog metoda merenja UKM. Indirektni metod ne zahteva prisustvo davača momenta koji bi se nalazio u osi sa vratilom MR kočnice. U slučaju ovog metoda merenja, sistem davača momenta može se postaviti tako da se sam merni uređaj izmestiti van ose vratila MR kočnice, obično pored samog laboratorijskog uređaja za merenje kočnog momenta MR kočnice. Takođe, sa praktične strane, saosnost MR kočnice i sistema davača momenta tada nije od značaja tokom merenja, što olakšava proces ponovnog postavljanja i/ili zamene MR kočnice, ali i ostalih elemenata laboratorijskog uređaja. Sa druge strane, učestalo rukovanje davačem momenta tokom montaže/demontaže povećava rizik od njegovog oštećenja. Do oštećenja davača momenta može doći usled nenamernog, nepažljivog rukovanja i javlja se kao posledica npr. pada davača sa određene visine, udara raznim alatima korišćenim tokom rada, nesaosnosti sa vratilom MR kočnice itd. Ovako nastala oštećenja davača momenta mogla bi dalje uzrokovati dobijanje netačnih rezultata merenja. Ukoliko bi se sistem davača momenta izmestio van ose pogonjenog vratila MR kočnice, a njegov fizički kontakt sa drugim elementima sveo na minimum, rizik od greške i oštećenja bi se, takođe, sveo na minimum. Zbog svega navedenog, odlučeno je da se u ovom istraživanju koristi indirektni metod merenja UKM, odnosno da se meri tzv. reaktivni moment.

Sistem za merenje vrednosti UKM osmišljen je tako da se iskoristi moment koji se sa rotora MR kočnice preko MR tečnosti prenosi na stator MR kočnice. Sistem davača momenta čine: merna poluga odgovarajuće dužine, koja je jednim svojim krajem konzolno spojena sa statorskim sklopom MR kočnice, a drugim oslonjena na davač sile, slika 4.8 a), b) i c). Na ovaj način, moment se preko merne poluge prenosi na mernu ćeliju, koja se nalazi na određenom rastojanju od ose vratila MR kočnice. Takođe, merna poluga je spojena sa statorskim sklopom u tački koja se nalazi na određenom rastojanju od same ose vratila MR kočnice, pa se položaj merne ćelije mora prilagoditi shodno tome. Merna poluga je konzolno spojena isključivo sa statorskim sklopom (kućištem) MR kočnice, što olakšava proces njene montaže odnosno demontaže, slika 4.8 b). Tokom preliminarnih merenja utvrđeno je da nivoi merne ćelije i vratila MR kočnice moraju biti isti i da se merna ćelija mora postaviti u idealno horizontalnom položaju, slika 4.8 c).

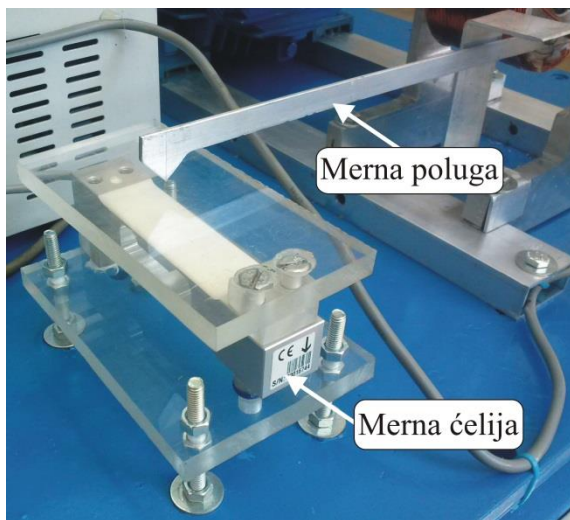
Ovakva linijska postavka laboratorijskog uređaja sadrži sledeće elemente: elektromotorni pogon, spojnicu prema MR kočnici, prvi nosač MR kočnice, MR kočnicu, drugi nosač MR kočnice, spojnicu prema enkoderu, enkoder, mernu polugu i mernu ćeliju, slika 4.9. Konstrukcija je osmišljena tako da, u slučaju potrebe skidanja MR kočnice, nema potrebe za pomeranjem bilo kog drugog bitnog elementa laboratorijskog uređaja. Svi elementi su postavljeni na noseću konstrukciju.



a)

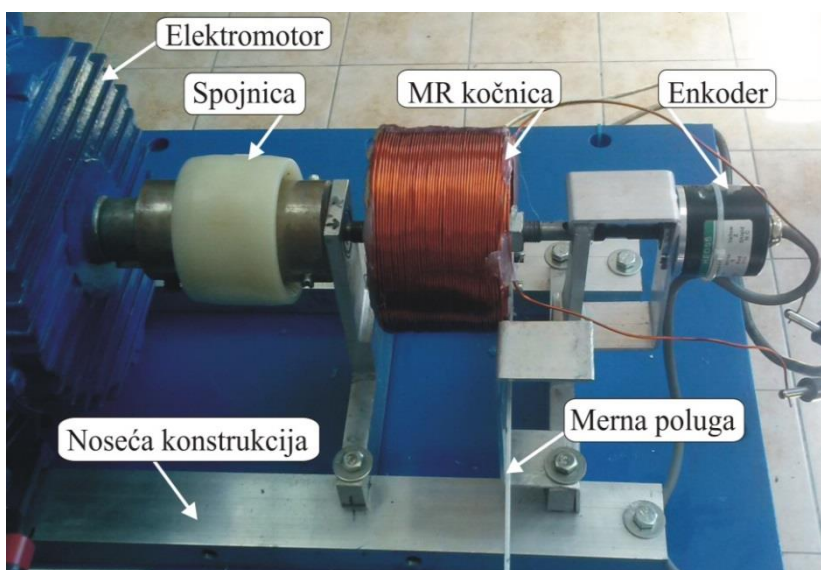


b)



c)

Slika 4.8. Merenje reaktivnog kočnog momenta magnetoreološke kočnice:
a) merna poluga,
b) oslanjanje merne poluge,
c) merna ćelija



Slika 4.9. Linijska postavka laboratorijskog uređaja za merenje reaktivnog kočnog momenta

4.3. Preliminarni prototipovi magnetoreološke kočnice

Na samom početku istraživanja javile su se određene nepoznanice vezane za konstrukciju MR kočnice. Iz tog razloga odlučeno je da se uradi nekoliko serija probnih merenja UKM, te je za tu svrhu napravljeno nekoliko preliminarnih prototipova MR kočnica. U nastavku ovog dela rada, predstavljene su samo dve uspešno izrađene konstrukcije preliminarnih prototipova MR kočnica. U oba slučaja, korišćen je isti indirektni metod merenja, u najvećoj meri ista merna oprema i isti elektromotorni pogon.

Konstruktivski nedostaci i iskustva stečena tokom merenja vrednosti UKM koji su uočeni kod prvog preliminarnog prototipa MR kočnice, otklonjeni su, odnosno preneti na drugi preliminarni prototip MR kočnice. Na prvom mestu, kao nedostatak konstrukcije laboratorijskog uređaja javio se uticaj vibracija elektromotornog pogona na rezultate merenja. Pored toga, utvrđeno je da se, pored ovog izvora, generisanje vibracija može pripisati i nesaosnosti vratila elektromotornog pogona i vratila MR kočnice. Ova dva vratila su bila spojena elastičnom spojnicom. Naknadnim podešavanjem, uticaj nesaosnosti na dodatnu pojavu vibracija je eliminisan. Ipak, vibracije nisu u potpunosti otklonjene. Pored nesaosnosti, primećeno je da postoji neznatno oscilovanje statorskog sklopa tokom rada laboratorijskog uređaja. Do oscilovanja statorskog sklopa dolazi zbog predviđenog postupka sklapanja MR kočnice, zbog čega stator i disk rotora nisu idealno paralelni. Do ove situacije je došlo jer prvobitno nije postojala mogućnost provere veličine procepa sa MR tečnošću između diska i statora. Naknadnim podešavanjima i ovaj nedostatak je otklonjen. Uticaj vibracija na rezultate merenja sada je bio sveden na minimum i pripisivao se radu elastične spojnice, ležajeva i zaptivnih elemenata MR kočnice.

Tokom rada, primećeno je da zbog male sopstvene mase laboratorijskog uređaja dolazi do njegovog pomeranja, jer nije postojala veza između laboratorijskog uređaja i podloge. Ovaj nedostatak je uklonjen kod drugog preliminarnog prototipa, postavljanjem laboratorijskog uređaja na novu noseću konstrukciju povezanu za masivan fundament.

Pored negativnog uticaja vibracija na rezultate merenja, promena radne temperature MR tečnosti bio je faktor koji je trebalo održavati u određenim granicama, $27^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, prema preporukama proizvođača. Promena temperature MR tečnosti tokom rada MR kočnice, nastajala je prvenstveno, prenosom toplote sa aktiviranog namotaja, ali i od toplote nastale trenjem između elemenata konstrukcije. Zagrevanje MR kočnice dovodilo je do promena u izmerenim vrednostima UKM, odnosno do pada vrednosti njegovih komponenti prilikom ponavljanja merenja nakon kratkog vremenskog perioda, tokom kog temperatura MR kočnice i MR tečnosti nisu bile adekvatno regulisane. Pored promene izmerenih vrednosti UKM, zbog porasta temperature MR tečnosti, dolazilo je porasta njenog pritiska u komornom prostoru, pa i do curenje tečnosti nosioca (ulja) na spojevima statorskog sklopa. Zbog uticaja na rezultate merenja i gubljenje dela tečnosti nosioca, odlučeno da se uvede prinudno hlađenje MR kočnice, ali i vod za ventiliranje komornog prostora sa MR tečnošću. Dodatno, ukupno vreme potrebno za izvršenje svih setova merenja je produženo jer su uvedeni dodatni vremenski intervali za hlađenje. Pored primene prinudnog hlađenja MR kočnice, odlučeno je da se ono primenjuje i na elektromotor. Zagrevanje elektromotora je bilo izraženo pri dužem radu pri manjim brojevima obrtaja: 50, 100, 150 min^{-1} , kada prinudno hlađenje elektromotora nije imalo željeni efekat.

Tokom merenja primećeno je da postoji značajan uticaj momenta inercije rotorskog sklopa na vreme zaustavljanja. Masa rotorskog sklopa, odnosno dejstvo inercijalnog momenta obrtnih delova, produžavalo je vreme zaustavljanja MR kočnice, pa je ova činjenica uzeta u obzir prilikom konstrukcije drugog preliminarnog prototipa. Ipak, smatrano je da je nužno zadržati odgovarajuću zapreminu feromagnetskog materijala konstrukcije MR kočnice kako bi se osiguralo generisanje

magnetskog polja odgovarajuće jačine, pa je odlučeno je da se u slučaju drugog preliminarnog prototipa MR kočnice promeni debljina diska a da prečnik ostane u predloženim okvirima. Na ovaj način, proporcionalno se smanjuje i vrednost prvenstveno indukovane komponente UKM, ali i vrednost momenta inercije zbog smanjenja mase diska. Tokom merenja, obavljenih sa drugim preliminarnim prototipom MR kočnice, primećeno je značajno smanjenje vremena potrebnog za zaustavljanje MR kočnice.

Smanjenje geometrijskih parametara diska MR kočnice direktno dovodi i do smanjenja vrednosti UKM. Zbog ovoga je kod drugog preliminarnog prototipa MR kočnice uveden dodatni disk na istom vratilu. Na ovaj način, promenjen je prvobitni tip MR kočnice iz disk u multidisk, ali se povećala vrednost UKM.

Na osnovu prethodno stečenih iskustava, drugi preliminarni prototip je imao značajno masivniji stator u odnosu na prvi preliminarni prototip. Sistem sklapanja MR kočnice je unapređen, pa je omogućeno fino podešavanja zazora.

Drugi preliminarni prototip osmišljen je tako da ima mogućnost rada samo sa jednim diskom ili sa dva diska a da se pri tome koriste isti elementi konstrukcije prototipa MR kočnice. Ovaj deo detaljnije je pojašnjen u sledećem potpoglavlju. Prethodno uočeni efekti nastali zagrevanjem i curenjem MR tečnosti odmah su uzeti u obzir, pa su postavljeni sistem prinudnog hlađenja i tzv. odušak komornog prostora u slučaju nepredviđenog širenja MR tečnosti unutar kočnice.

Sistem reaktivnog merenja UKM zadržan je i u slučaju drugog preliminarnog prototipa MR kočnice, jer se pokazao kao vrlo lak za upotrebu prilikom čestih podešavanja, neophodnih pre samog početka merenja. U slučaju drugog preliminarnog prototipa, MR kočnica se više puta morala skidati sa ispitnog stola, podešavati i ponovo vraćati na svoje mesto, a da se davač sile nije morao pomerati ni u jednom slučaju. Pored podešavanja, MR kočnica je skidana i u slučajevima kada ju je bilo neophodno napuniti MR tečnošću, posle merenja frikcionu komponentu UKM.

Prilikom punjenja MR kočnice MR tečnošću, moralo se voditi računa o pojavi tzv. vazdušnih džepova u komornom prostoru, a koji bi svojim postojanjem smanjili količinu MR tečnosti u MR kočnici a time direktno uticali i na smanjenje UKM. Preciznim merenjem količine MR tečnosti tokom sipanja i konstantnim rotiranjem vratila tokom tog postupka, vodilo se računa da do ove pojave ne dođe. Primećeno je da se vazdušni džepovi lako mogu eliminisati iz MR kočnice pogodnim postavljanjem otvora za sipanje MR tečnosti u odnosu na odušak. Tokom sipanja MR tečnosti kroz otvor većeg prečnika i konstantnog rotiranja vratila, najveći deo vazduha je izbačen iz sistema. Preostali vazduh je izbačen preko otvora oduška, kada je u MR kočnicu u normalnom položaju, prinudno, pod pritiskom ubrizgana dodatna količina MR tečnosti. Određena količina MR tečnosti se na ovaj način izgubila usled curenja preko oduška, ali je prisustvo vazduha u unutrašnjosti MR kočnice sa sigurnošću bilo eliminisano.

Iskustva stečena tokom konstruisanja ova dva preliminarna prototipa i merenja vrednosti njihovih komponenti UKM primenjena su na konstrukcije predstavljene u poglavlju 6. U nastavku ovog dela teksta predstavljene su konstrukcije prvog i drugog preliminarnog prototipa MR kočnice, a dat je i pregled ostalih elemenata laboratorijskih uređaja. Pregled tehničke dokumentacije dat je u poglavlju 10.

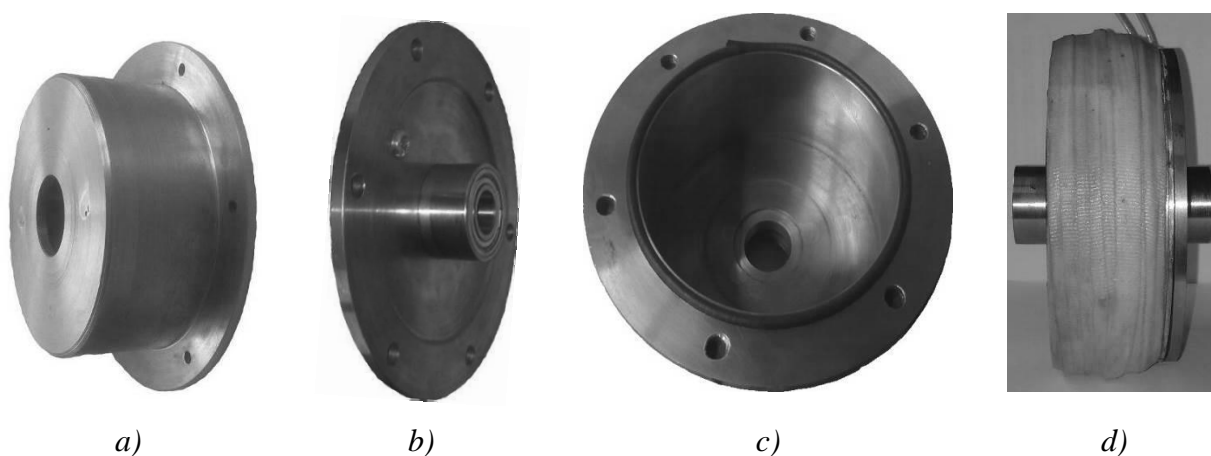
4.3.1. Prvi preliminarni prototip magnetoreološke kočnice

Na osnovu prethodnih saznanja o konstrukcijama MR kočnica, odlučeno je da, u slučaju prvog preliminarnog prototipa MR kočnice, postojanje kućišta kao zasebnog elementa konstrukcije nije u potpunosti nužno, već da tu ulogu može preuzeti statorski sklop. Na ovaj način došlo bi se do određene uštede u masi same konstrukcije, a ujedno je omogućeno i jednostavnije instaliranje namotaja. U nastavku ovog dela teksta, termin „prvi preliminarni prototip MR kočnice“ zamenjen je terminom „MR kočnica“.

Osnovni konstrukcioni parametri MR kočnice dati su u tabeli 4.1. Statorski sklop, kao jedan od osnovnih elemenata konstrukcije MR kočnice, sastojao se od dva zasebna elementa – nosača namotaja i poklopca, slika 4.10 a) i b). Po svom obimu, oba elementa statorskog sklopa imaju jednak broj otvora, predviđenih za njihovo međusobno spajanje, slike 4.10 a), b) i c). Pored ovih otvora, poklopcu statora dodat je još jedan otvor koji je imao dvostruku ulogu: ulogu otvora za sipanje MR tečnosti u komorni prostor i ulogu odzrake komornog prostora. Na slici 4.10. c) prikazan je zaptivni element, čija je uloga zaptivanje samog komornog prostora, a postavljen je u za tu svrhu specijalno izrađenom kanalu na spoju dve polovine statora. Na slici 4.10 d) predstavljen je stator u sklopu sa namotajem. Na istoj slici mogu se videti dva nosača namenjenih ležajevima i zaptivnim elementima.

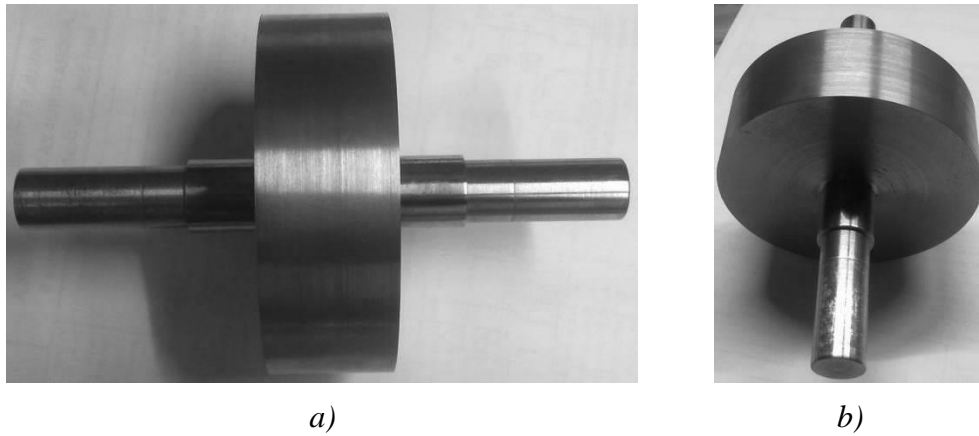
Tabela 4.1. Osnovni parametri prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke disk kočnice

Parametar	Vrednost
Spoljašnji prečnik MR kočnice, mm	110
Dužina MR kočnice, bez vratila, mm	48
Prečnik diska, mm	96,4
Debljina diska, mm	34,1
Prečnik vratila, mm	20
Ukupan zazor MR tečnosti, mm	7,6
Broj zavojaka, -	≈ 840

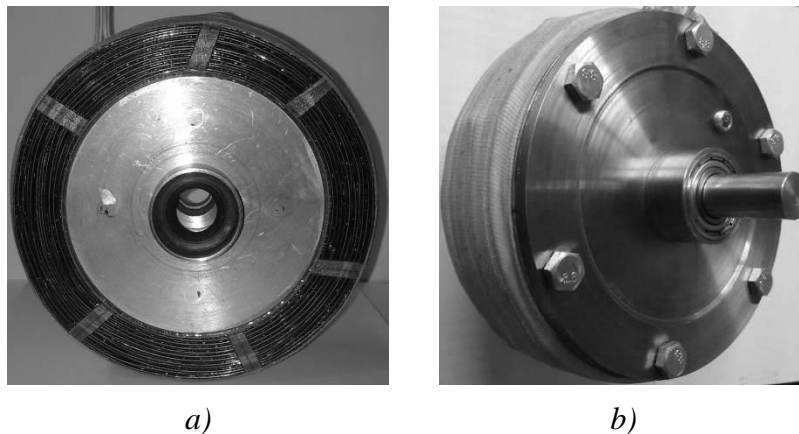


Slika 4.10. Statorski sklop prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke disk kočnice:
 a) nosač namotaja, b) poklopac, c) zaptivni element na nosaču namotaja,
 d) stator u sklopu sa namotajem i nosačima ležajeva

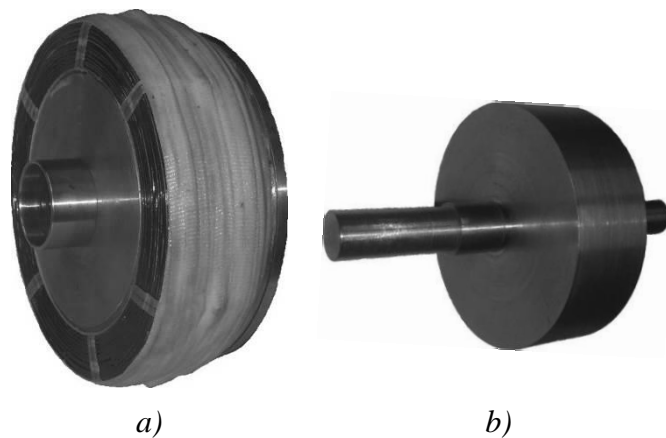
Rotorski sklop, MR kočnice sastojao se od diska i vratila, aksijalno postavljenog u odnosu na statorski sklop. Rotorski sklop uležišten je u statorskim polovinama preko seta kugličnih ležajeva. Sam rotorski sklop je predstavljen na slikama 4.11 a) i b). Namotaj u sklopu sa statorom je predstavljen na slici 4.12. Prikaz odnosa svih elemenata MR kočnice dat je na slici 4.13.



Slika 4.11. Rotorski sklop prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke disk kočnice



Slika 4.12. Prvi preliminarni prototip magnetoreološke disk kočnice:
a) namotaj u sklopu sa statorom, b) sklopljena kočnica



Slika 4.13. Međusobni odnos elemenata prvog preliminarnog prototipa:
a) sklop stator-namotaj, b) rotor

Namotaj MR kočnice je postavljen po spoljašnjem obodu nosača namotaja. Namotaj je izrađen od lakom izolovanog bakarnog provodnika, prečnika 1 mm. Maksimalno dozvoljena struja trajnog opterećenja za ovaj prečnik bakarnog provodnika je 16 A pri 25 °C. Ipak, na osnovu svih okolnosti kojima bi ovakav provodnik bio izložen zatim broja i gustine zavoja i raspoložive opreme, odlučeno je da maksimalna struja trajnog opterećenja provodnika ne treba da prelazi 2 A. Zbog ovog ograničenja, upravljačka struja namotaja bila je u opsegu od 0 do 2 A, sa inkrementalnim korakom od 0,2 A.

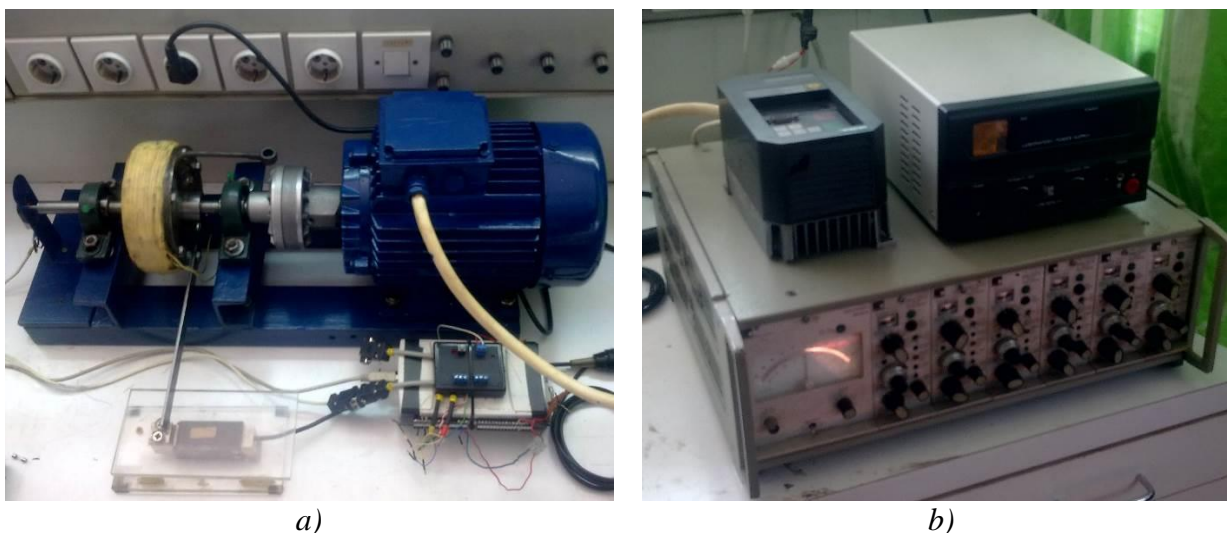
Za elektromotorni pogon laboratorijskog uređaja odabran je osmopolni asinhroni zatvoreni kavezni motor, model 5 AZ 100 LA – 8 (*Končar*), snage 0.75 kW i nazivne brzine od 700 min⁻¹. Upravljanje elektromotorom je vršeno preko frekventnog pretvarača, Micro Master (*Siemens*). Na ovaj način, omogućeno je upravljanje smerom obrtanja i brojem obrtaja elektromotora. Raspon broja obrtaja elektromotora od 100 min⁻¹ do 700 min⁻¹ podeljen je korakom od 50 min⁻¹. Variranje broja obrtaja je vršeno frekvencijski. Elektromotor i frekventni pretvarač formiraju pogon laboratorijskog uređaja. Pogon je postavljen na sam početak noseće konstrukcije ispitnog stola a vratilo elektromotora je sa vratilom MR kočnice spojeno elastičnom spojnicom. Drugi kraj vratila MR kočnice spojen je sa enkoderom, AMT102-V-REV-C (*CUI INC*), slika 4.14 a). Učestanost uzorkovanja enkodera je bila 2048 uzoraka za jedan obrtaj vratila. MR kočnica oslonjena je na noseći konstrukciju preko dva samopodesiva ležaja sa kućištima, P203 (*FK*). Noseća konstrukcija je, u ovom slučaju, bila sačinjena od dva podužna i dva poprečna čelična U profila. Iako masivna, ovakva noseća konstrukcija bila je podložna uticaju vibracija te je dolazilo do njenog neznatnog, ali vidljivog pomeranja sa početne pozicije tokom merenja.

Vrednost upravljačke struje namotaja kontrolisana je preko izvora stabilisanog napona, radnog naponskog opsega od 0 do 16 V i strujnog opsega od 0 do 10 A, EA PS 2016-100 (*Elektro-automatik*). Upravljačka struja je inkrementalno varirana korakom od 0,2 A. Broj obrtaja i vrednost upravljačke struje predstavljaju ulazne parametre MR kočnice.

Reaktivni kočni moment, generisan na statoru se prenosio na mernu ćeliju preko merne poluge. Dužina merne poluge, od ose vratila MR kočnice do tačke dodira sa mernom ćelijom, bila je 250 mm. Merna ćelija, model 1030 (*Tedea-Huntleigh*), postavljena je paralelno sa nosećom konstrukcijom laboratorijskog uređaja, slika 4.14 a). Pre svake serije merenja, tačnost merenja merne ćelije proverena je baždarenim tegovima. Izmerene vrednosti, dobijene sa merne ćelije, šalju se na univerzalni osmokanalni pojačavač signala, KWS 673.A2 (*HBM*) a potom, paralelno sa signalom sa enkodera obrađene u merno-akvizicionoj kartici, NI USB-6210 (*National Instruments*). Ovako pripremljeni podaci su potom digitalizovani i izveženi u odgovarajućem elektronskom formatu ka računaru na dalju obradu. Krajnji rezultati merenja su predstavljeni u obliku zavisnosti promene momenta u odnosu na vreme i broj obrtaja vratila, za sve tri komponente UKM.

Procedura merenja vrednosti komponenti UKM, podeljena je na tri dela. Prvo je izvršeno merenje vrednosti frikcione komponente i to u serijama od po tri merenja, sa minimalnim vremenom trajanja merenja od 2 min. Merenje je vršeno za svaku predviđenu brzinu obrtanja vratila elektromotora. U slučaju merenja vrednosti frikcione komponente UKM, nije bilo potrebe za izvorom prinudnog hlađenja MR kočnice, jer je zagrevanje bilo zanemarivo. Vrednost temperature MR kočnice i elektromotora su periodično kontrolisane laserskim meračem temperature Testo 830 T1 (*Testo AG*), za sve komponente UKM, tokom celog perioda merenja.

Ista merna procedura je primenjena i kod merenja sume frikcione i viskozne komponente UKM. Uticaj podmazujućih svojstava MR tečnosti posebno je uzet u obzir, pa je na kraju merenja svih komponenti UKM, MR kočnica rastavljena, očišćena od MR tečnosti, sastavljena i ponovo postavljena na laboratorijski uređaj. Ponovo je izvršeno merenje, kako bi se utvrdilo da li je došlo do značajnije promene u vrednosti frikcione komponente UKM. Nije primećena značajnija promena vrednosti dobijenih rezultata u odnosu na rezultate dobijene prilikom prvobitnog merenja ove komponente.



Slika 4.14. Laboratorijski uređaj za ispitivanje kočnih svojstava prvog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice:

a) izvršni deo laboratorijskog uređaja, b) upravljački deo laboratorijskog uređaja

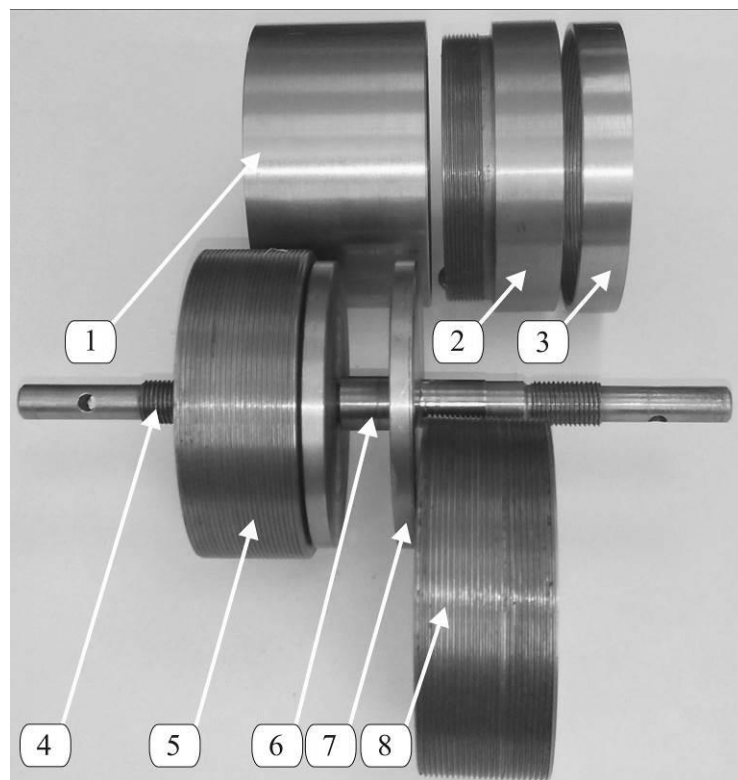
Poslednja serija merenja obuhvatila je merenje vrednosti sume sve tri komponente UKM. U MR kočnicu je u prethodnoj seriji merenja sipana odgovarajuća količina MR tečnosti, ostavljajući dovoljno vremena kako bi MR tečnost što bolje popunila predviđeni prostor. Zatim je još jednom izvršeno dolivanje MR tečnosti, sve do trenutka kada deo nje nije počeo da izlazi kroz cev oduška. Na ovaj način, moglo se sa velikom sigurnošću reći da se u komornom prostoru nalazila isključivo MR tečnost. Isti set brzina vrtila koristio se i u trećoj seriji merenja. Za svaki broj obrtaja posebno, postepeno se kroz namotaj uspostavlja upravljačka struja sve do punog opsega. Na ovaj način dobijene su vrednosti UKM za sve vrednosti upravljačke struje pri svim predviđenim brojevima obrtaja. Za svako merenje vrednosti UKM, predviđeno je vreme u trajanju od najmanje 2 min. U tom vremenskom periodu, izvršene su po tri sukcesivne aktivacije namotaja, odnosno uključivanja stabilisanog izvora napona, u trajanju od najmanje 15 s. Između svake aktivacije namotaja ostavljeno je vreme od najmanje 15 s kako bi se dozvolilo MR tečnosti da se vrati u tzv. rasterećeno stanje. Pogon je tokom merenja radio bez prekida. Posle svake serije merenja, usledila bi pauza, koja se koristila za podešavanje ulaznih parametara MR kočnice. Tokom pauze, feromagnetske čestice bi se ponovo ravnomerno raspoređivale po celoj zapremini MR tečnosti. Poremećaj u rasporedu feromagnetskih čestica nastajao je zbog učestalog uticaja magnetskog polja ali i zbog centrifugalnog efekta. Ovi efekti imaju negativan uticaj na MR kočnice tokom eksploatacije. Tokom ove serije merenja javila se potreba za prinudnim hlađenjem laboratorijskog uređaja, posebno tokom merenja vrednosti UKM pri najmanjem broju obrtaja, a najvećem intenzitetu upravljačke struje.

Konstruktivni parametri ove MR disk kočnice i ispitnog stola, poput dimenzija elemenata, njihovog oblika, načina izrade, sklapanja itd., određeni su na osnovu inženjerske prakse, ali i dostupnosti materijala i elemenata.

4.3.2. Drugi preliminarni prototip magnetoreološke kočnice

Na osnovu ostvarenih rezultata i stečenih iskustava u radu sa prvim preliminarnim prototipom MR disk kočnice, pristupilo se projektovanju i izradi drugog preliminarnog prototipa MR kočnice. U ovom slučaju, odlučeno je da drugi preliminarni prototip MR disk kočnice bude izrađen od čelika C15E. Nova konstrukcija MR kočnice, predviđa upotrebu samo jednog diska konfiguraciji ili dva diska za MR multidisk konfiguraciju. Ovakva koncepcija zahtevala je modularan pristup, gde je ideja bila da se u oba slučaja iskoristi što više zajedničkih elemenata konstrukcije MR kočnice. Naravno, razlika u ukupnoj dužini MR kočnice je morala postojati, ali je konačno rešenje izvedeno na taj način da promena dužine bude neznatna i kompenzovana dodatnim elementima statorskog i rotorskog sklopa. Svi elementi drugog preliminarnog prototipa MR kočnice prikazani su na slici 4.15.

Kao i slučaju prvog preliminarnog prototipa MR disk kočnice, i u slučaju drugog preliminarnog prototipa MR kočnice (dalje samo MR kočnice), statorski sklop se sastojao od nekoliko elemenata. Činili su ga tri statora i dva prstena. Statori su nazvani: stator - levi, stator - srednji i stator - desni, a prstenovi – veći i manji. U konfiguraciji MR multidisk kočnice bili su upotrebljeni svi elementi konstrukcije sa slike 4.15. U konfiguraciji MR disk kočnice, stator - srednji i mali prsten nisu iskorišćeni u glavnom sklopu. Osnovni konstrukcioni parametri prvog preliminarnog prototipa dati su u tabeli 4.2.

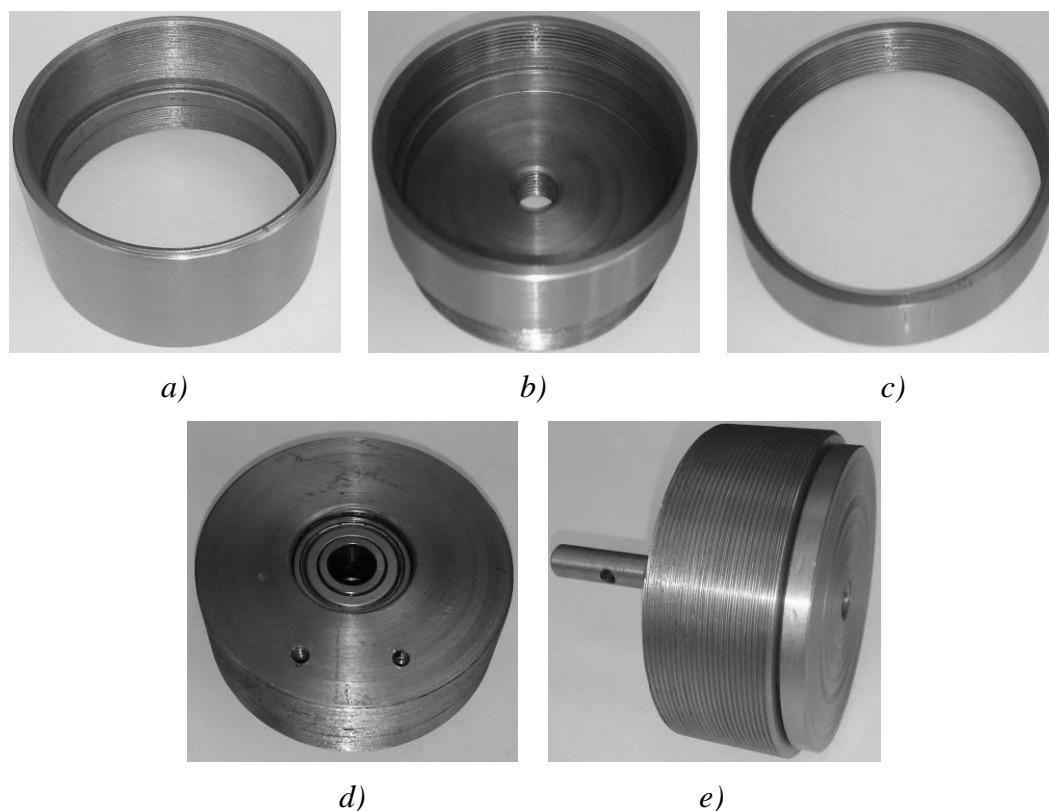


Slika 4.15. Elementi drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice:
1) veći prsten, 2) stator - srednji, 3) mali prsten, 4) prvi rotor, 5) stator - levi, 6) odstožnik,
7) drugi rotor, 8) stator - desni

Na slici 4.16. prikazani su svi elementi statorskog sklopa. Stator – levi i stator - desni su, pored svoje osnovne uloge baze kućišta MR kočnice, imali i ulogu nosača ležajeva i zaptivnih elemenata.

Tabela 4.2. Osnovni parametri drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice

Parametar	Vrednost
Spoljašnji prečnik MR kočnice, mm	73
Dužina MR disk kočnice, bez vratila, mm	54
Dužina MR multidisk kočnice, bez vratila, mm	81.75
Dužina MR disk kočnice sa vratilom, mm	132
Dužina MR multidisk kočnice sa vratilom, mm	147
Prečnik diska, mm	63
Debljina diska, mm	5
Prečnik vratila, mm	9
Ukupan zazor MR tečnosti kod MR disk kočnice, mm	1
Ukupan zazor MR tečnosti kod MR multidisk kočnice, mm	2
Broj zavojaka, -	250; 500



Slika 4.16. Elementi statorskog sklopa drugog preliminarnog prototipa:
a) veći prsten, b) stator - srednji, c) manji prsten, d) stator - levi,
e) stator - desni u sklopu sa prvim rotorom

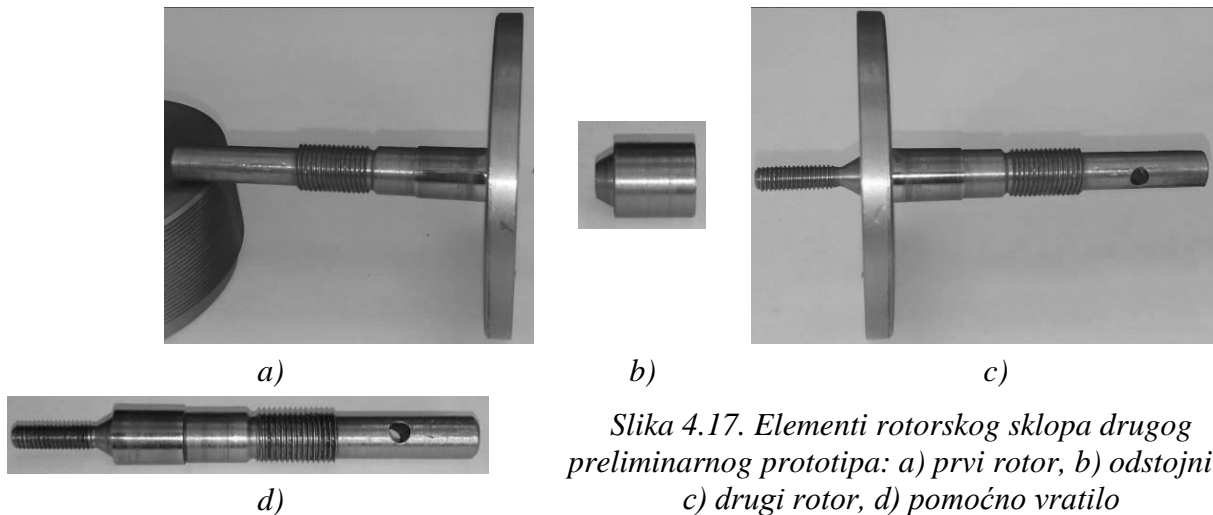
Od prvog preliminarnog prototipa MR kočnice preuzet je i sistem za sipanje MR tečnosti i odzračivanje komornog prostora preko oduška, pa tako i levi i desni stator na svojim baznim površinama poseduju otvore odgovarajuće namene. Spajanje elemenata statora, ovog puta je izvršeno navojnom vezom. Elementi statorskog sklopa su po svojim obodnim površinama posedovali navoje finog koraka, statori - po spoljnim obodnim površinama a veći i manji prsten - po svojim unutrašnjim obodnim površinama. Izuzetak je predstavljao stator – srednji koji je zbog svoje specifične namene posedovao navoje i sa unutrašnje i sa spoljašnje strane, slika 4.16 b). Na istoj slici se u donjem delu vidi spoljašnji navoj, a u gornjem delu slike - unutrašnji navoj. Navojni spoj odabran je jer je pružao mogućnost finog podešavanja međusobnog odnosa elemenata MR kočnice. Ova mogućnost nije postojala kod prvog preliminarnog prototipa MR kočnice, što je predstavljalo nedostatak, jer nije postojala mogućnost finog podešavanja veličine procepa sa MR tečnošću. Takođe, ovaj način sklapanja MR kočnice omogućava kompenzovanje eventualnog postojanja prevelike aksijalne sile na ležajima, koja ima negativan uticaj na rad MR kočnice, a javlja se tokom procesa sklapanja MR kočnice. Aksijalno opterećenje ležajeva utiče i na rezultate merenja komponenti UKM, dodajući neželjeni šum merenju.

Statorski sklop preuzeo je ulogu kućišta MR kočnice i u njemu je smešten rotorski sklop. Rotorski sklop sastojao se od četiri elementa, koji su se u zavisnosti od varijante MR kočnice, međusobno kombinovali, slika 4.17. U varijanti MR disk kočnice, korišćeni su samo prvi rotor i pomoćno vratilo, slika 4.18 a), dok su oba rotora i tzv. odstojnik korišćeni za multidisk varijantu MR kočnice. U multidisk varijanti pomoćno vratilo nije korišćeno, slika 4.18 b). Radi održavanja idealne saosnosti na vratilu su izrađeni konusni centrirajući elementi. Pomoćno vratilo i vratilo drugog rotora posedovali su spoljašnje konuse. Vratilo prvog rotora imalo je unutrašnji konus, dok je odstojnik imao i spoljašnji i unutrašnji konus. Orijentacija konusa prvog rotora, izrađenog u dodirnoj oblasti diska i vratila, bila je takva da je omogućeno naleganje spoljašnjeg konusa odstojnika ili konusa druga dva vratila. Spajanje rotorskog sklopa izvedeno je navojnom vezom. Drugi rotor i pomoćno vratilo su na svom najmanjem prečniku posedovali deo sa navojem finog koraka. Ovaj deo vratila imao je ulogu zavrtnja koji se uvrtao u rupu prvog rotora, u kojoj je izrađen odgovarajući unutrašnji navoj. U slučaju multidisk MR kočnice, zavrtnjski deo vratila bi prolazio i kroz odstojnik, baš kako je to predstavljeno na slici 4.18. b).

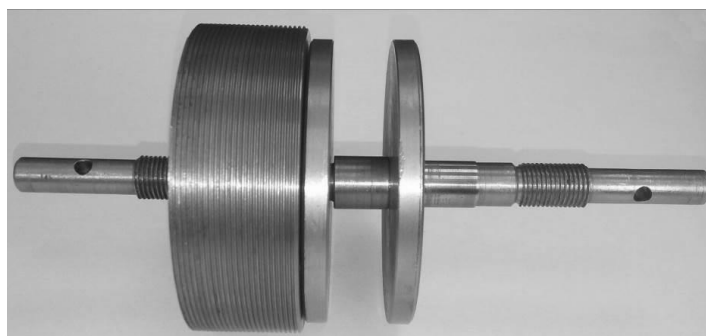
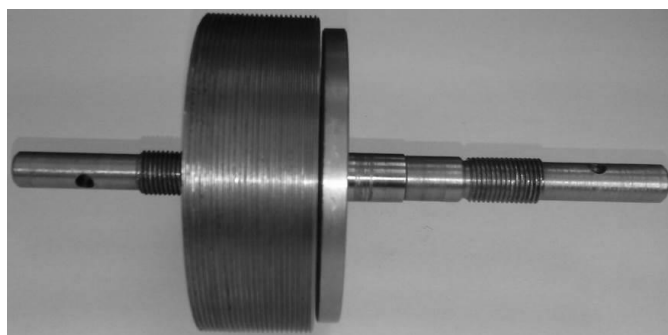
Kako bi se postigla tačnost veličine procepa sa MR tečnošću – g , na sva tri vratila izrađeni su navoji većeg prečnika, slike 4.17 a), c) i d). i 4.18 a) i b). Uloga ovih navoja je bila da se, u kombinaciji sa odgovarajućim navrtkama, vrši aksijalno pomeranje rotorskog sklopa u odnosu na statorski sklop, i održavanje takve pozicije tokom rada. Ostvarena je veličina pojedinačnog procepa – g sa MR tečnošću od 0,5 mm.

Namotaj je postavljen po spoljašnjem obodu statorskog sklopa. U ovom slučaju, napravljena su dva namotaja od 250 i 500 zavojaka, kako bi se mogao ostvariti veći broj merenja sa različitim jačinama magnetskog polja. Ponovo je korišćen lakom izolovani bakarni provodnik, prečnika 1 mm. Opseg upravljačke struje postavljen je od 0 A do 10 A, sa inkrementalnim korakom od 2 A. Kao i u slučaju laboratorijskog uređaja prvog preliminarnog prototipa MR kočnice, i ovde su iskorišćeni isti izvor napajanja i isti elektromotor. Ipak, upravljanje radom elektromotora je ovoga puta vršeno preko frekventnog pretvarača – VLT 5400 (*Danfoss*). Radni opseg i inkrement promene broja obrtaja elektromotora ostao je isti. Osmokanalni pojačavač signala i merno-akviziciona iz merne instalacije prethodnog laboratorijskog uređaja su ovog puta zamenjeni novom merno-akvizicionom karticom, Quantum MX840A (*HBM*).

Elektromotor, MR kočnica i enkoder postavljeni su na novoizrađenu noseću konstrukciju ispitnog stola, slika 4.19. Noseća konstrukcija je ovog puta pričvršćena za masivni fundament, kako bi se dodatno eliminisao uticaj vibracija. Korišćena je ista merna procedura za određivanje vrednosti komponenti UKM, kao i u slučaju prvog preliminarnog prototipa MR kočnice.



Slika 4.17. Elementi rotorskog sklopa drugog preliminarnog prototipa: a) prvi rotor, b) odstožnik, c) drugi rotor, d) pomoćno vratilo



Slika 4.18. Rotorski sklopovi drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice: a) rotorski sklop magnetoreološke disk kočnice, b) rotorski sklop magnetoreološke multidisk kočnice



Slika 4.19. Laboratorijski uređaj za ispitivanje kočnih svojstava drugog preliminarnog prototipa magnetoreološke kočnice

5. Raspodela magnetskog polja i predlog kombinovanja radnih režima magnetoreološke tečnosti

U ovom delu rada, opisana je raspodela magnetskog polja kroz konstrukciju MR disk kočnice, a posebno u oblasti od interesa, te razmatrano kombinovanje radnih režima MR tečnosti. Posmatrani model MR kočnice predstavljen je u preseku. Presek se formira po presečnoj ravni koja sadrži osu vratila. Takođe, zbog položaja i oblika namotaja, aksijalno postavljenog oko cilindričnog tela MR kočnice, smatra se da se magnetsko polje kroz MR kočnicu uspostavlja potpuno simetrično u odnosu na osu vratila.

Poseban akcent će se staviti na raspodelu magnetske indukcije kroz oblasti MR kočnice koji ne sadrže MR tečnost, a nalaze se u neposrednoj blizini oblasti sa MR tečnošću. Takođe, naknadnim dodavanjem paramagnetskog materijala u konstrukciju MR kočnice, predstaviće se mogućnost usmeravanja magnetske indukcije ka delovima MR kočnice koji su od najvećeg interesa za generisanje UKM.

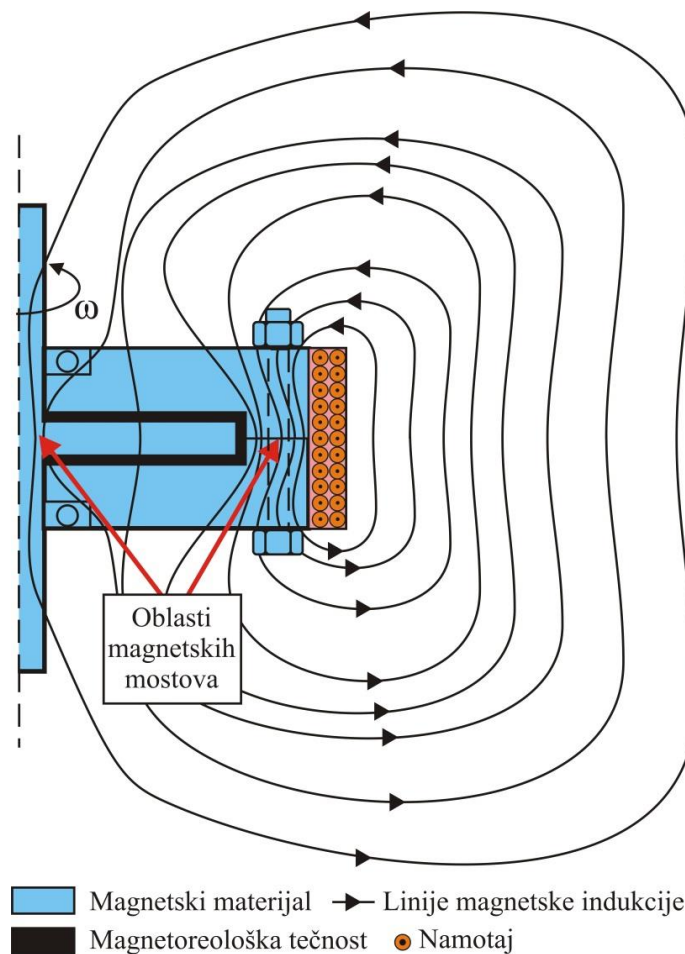
Promene u prostornoj raspodeli magnetskog polja i magnetske indukcije imaju za cilj povećanje efekta koju imaju na MR tečnost, a samim tim i povećavanje vrednost UKM.

5.1. Raspodela magnetskog polja

Sa magnetske tačke gledišta, MR kočnica se pojednostavljeno može posmatrati kao elektromagnet jednosmerne struje. MR kočnica je sačinjena od određenog broja namotaja i feromagnetskog jezgra cilindričnog oblika. Postoje varijacije, ovakve cilindrične koncepcije, i obično su vezane za međusobni odnos namotaja i elemenata kočnice, prvenstveno rotorskog sklopa. Koaksijalan odnos namotaja i rotorskog sklopa, odnosno sklopa vratilo-disk, uobičajen je za konstrukciju MR disk kočnice. Disk je uvek okružen tankim slojem MR tečnosti, na koju kroz statorski sklop deluje magnetsko polje. Zbog pojedinih specifičnosti različitih tipova konstrukcija MR kočnica i njihovog načina zatvaranja komornog prostora, može doći do umanjenja jačine magnetskog polja u oblastima od interesa, a samim tim i do umanjenja uticaja koji magnetsko polje ima na MR tečnost. Umanjenje efekta magnetskog polja na MR tečnost može biti uzrokovano postojanjem tzv. „magnetskih mostova“, feromagnetskih oblasti konstrukcije MR kočnice koje ne sadrže MR tečnost na koju bi magnetsko polje delovalo. Postojanje magnetskih mostova često nije moguće izbeći zbog geometrijskih ograničenja konstrukcije, pa iz tog razloga dolazi do neuniformne raspodele magnetskog polja u telu MR kočnice. Raspodela feromagnetskog materijala u telu MR kočnice dovodi do specifičnog oblika raspodele magnetske indukcije, kako je to ilustrovano na slici 5.1.

Intenzitet vektora magnetske indukcije u oblasti magnetskih mostova može biti toliki da materijal vodi u zasićenje. Magnetski mostovi kod MR disk kočnice se formiraju u dve oblasti. Prva oblast obuhvata deo statorskog sklopa neposredno ispod namotaja a u okolini temenog dela diska, slika 5.1. Ova oblast ima malu površinu poprečnog preseka u poređenju sa površinom poprečnog preseka statorskog sklopa i ne sadrži MR tečnost na koju se može delovati magnetskim poljem pa samim tim ne doprinosi generisanju UKM. Između ovog magnetskog mosta i temenog dela diska nalazi se određena količina MR tečnosti. Zbog svog položaja i načina na koji magnetsko polje na nju deluje, ovaj deo MR tečnosti takođe ne doprinosi generisanju UKM.

Druga oblast, gde se formira magnetski most, je oblast spoja vratilo-disk, slika 5.1. Veličina poprečnog preseka ove oblasti, takođe je značajno manja od površine poprečnog preseka statorskog sklopa. U okolini ove oblasti takođe postoji određena količina MR tečnosti na koju magnetsko polje može adekvatno delovati.



Slika 5.1. Ilustracija preseka modela klasične magnetoreološke disk kočnice i raspodele magnetske indukcije, [142]

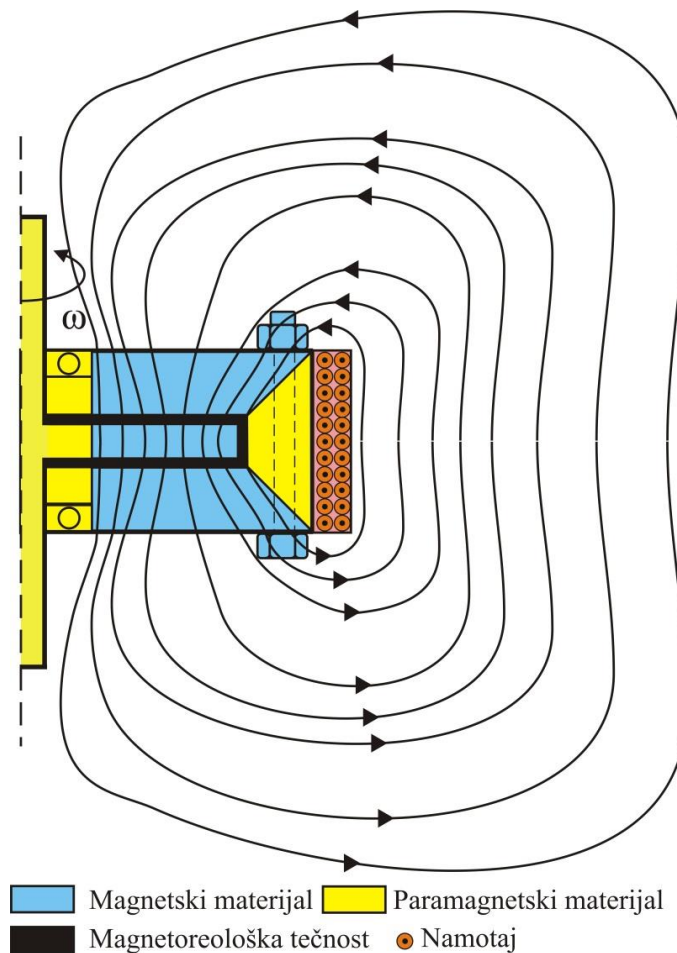
Magnetska indukcija je veća u oblastima magnetskih mostova nego u oblastima koje sadrže MR tečnost. Razlog tome je razlika u vrednostima magnetske permeabilnosti materijala. Feromagnetski materijali, poput gvožđa, čelika i sl. imaju višestruko veće vrednosti magnetske permeabilnosti u poređenju sa MR tečnošću, a još veće u poređenju sa paramagnetskim materijalima. Statorski i rotorski sklopovi MR kočnice obično su u potpunosti sačinjeni od magnetski mekog čelika. Ukoliko postoji kontinualna putanja kroz feromagnetske elemente MR kočnice, magnetska indukcija će se u najvećoj meri tuda i uspostaviti.

U konfiguraciji, kakva je predstavljena na slici 5.1, intenzitet vektora magnetske indukcije u oblastima magnetskih mostova je veća u poređenju sa oblastima koje sadrže MR tečnost. Ovakve pojave direktno utiču na vrednosti UKM.

5.2. Predlog kombinovanja radnih režima magnetoreološke tečnosti

Posmatrajući odnos vektora magnetske indukcije i vektora normale aktivne površine MR tečnosti, na koje magnetsko polje deluje u klasičnoj konstrukciji MR disk kočnice, može se zaključiti da najveći deo (zapremina) MR tečnosti radi u tangencijalnom režimu rada. Ovaj deo MR tečnosti nalazi se između aktivnih površina statorskog i rotorskog sklopa. Preostali, manji, deo MR tečnosti se nalazi u temenoj oblasti diska. Na ovaj deo MR tečnosti takođe se deluje magnetskim poljem ali u ovom delu MR tečnosti lančaste strukture svojim krajevima ne povezuju aktivne površine rotorskog sa aktivnim površinama statorskog sklopa tj. kontakt lančastih struktura i temene površine diska ne postoji. Zbog toga se doprinos ovog dela MR tečnosti, u klasičnoj konstrukciji MR disk kočnice, vrednosti UKM posmatra isključivo kroz viskoznu komponentu kočnog momenta.

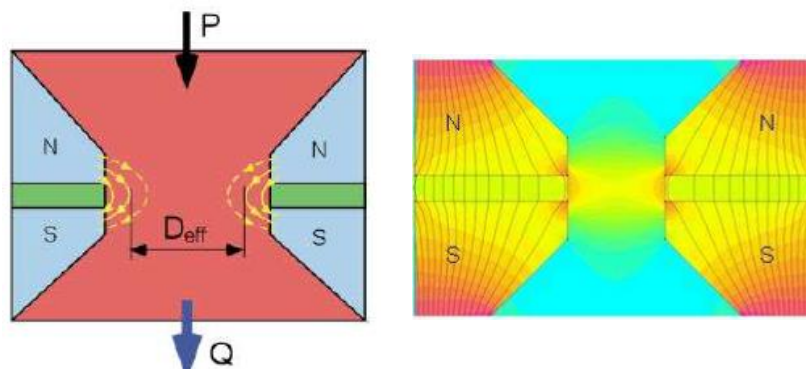
Dodavanjem paramagnetskog materijala u klasičnu konstrukciju MR kočnice, posebno u okolini temene oblasti diska, stiče se uslov za stvaranje drugačije raspodele magnetskog polja. Paramagnetski materijal smanjuje površinu poprečnog preseka feromagnetskog statorskog sklopa u okolini diska. Ovakva izmena u konstrukciji eliminiše postojanje magnetskog mosta temene oblasti diska, slika 5.2. Pored temene oblasti diska, drugi magnetski most, na mestu spoja vratilo-disk, takođe se može eliminisati upotrebom paramagnetskog materijala, što doprinosi još boljem usmeravanju linija magnetske indukcije, slika 5.2.



Slika 5.2. Ilustracija raspodele magnetske indukcije kroz konstrukciju magnetoreološke disk kočnice sa dodatnim paramagnetskim elementima, [142]

Upotreba paramagnetskog materijala u konstrukciji MR uređaja [29] povećava efekat magnetskog polja na MR tečnost. Upotrebom paramagnetskog materijala specifičnog oblika menja se oblik raspodele magnetske indukcije koji se razlikuje od oblika raspodele magnetske indukcije u klasičnoj konstrukciji MR kočnice [50]. Promena raspodele magnetske indukcije dovodi do promene u vrednosti međusobnih sila privlačenja feromagnetskih čestica u lančastim strukturama MR tečnosti. Na ovaj način povećava se vrednost ukupnog kočnog momenta [143 - 145]. Promene u raspodeli magnetske indukcije mogu se odrediti modelovanjem ovakvog sistema primenom metode konačnih elemenata. Jedna ovakva postavka predstavljena je u Poglavlju 7.

U sličnoj postavci, Gončalves [51] je primetio postojanje efekta magnetskog polja na MR tečnost u koničnom otvoru i definisao ga kao novi režim rada, režim uštinuća. Gončalves, između ostalog navodi da se ovako neuniformnim oblikom magnetskog polja može upravljati parametrima MR tečnosti na malom delu konstrukcije MR uređaja, slika 5.3. Na slici 5.3 sa N i S su obeleženi polovi magnetskog polja a sa P pritisak MR tečnosti.



Slika 5.3. Radni režim uštinuća, [51]

Ovaj režim se prema principu rada značajno razlikuje od ostalih režima, prethodno predstavljenih u poglavlju 2. Isključivo u ovom režimu, na MR tečnost se deluje lokalizovano, što nije slučaj kod ostalih režima gde se magnetskim poljem deluje na ukupnu zapreminu MR tečnosti. U slučaju Gončalvesove postavke, slobodno strujanje MR tečnosti je ograničeno postojanjem lokalizovanog magnetskog polja u čijoj oblasti se formiraju lančaste strukture. Osnovne razlike između Gončalvesove postavke i postavke predstavljene ovom radu su: smer strujanja MR tečnosti i konstrukcija predložene MR kočnice.

6. Eksperimentalni sistem

Na osnovu prethodno stečenih iskustava i uočenih konstrukcijskih nedostataka kod preliminarnih prototipov MR kočnice, pristupilo se projektovanju i izradi nove, unapređene konstrukcije MR disk kočnice. Osnovna ideja, prilikom konstruisanja nove MR disk kočnice bila je usmeravanje magnetskog polja u oblast diska.

U nastavku ovog dela rada, predstavljena je nova konstrukcija MR disk kočnice. Radi poređenja ostvarenih rezultata novog prototipa MR kočnice neophodni su podaci o rezultatima referentne MR kočnice, istih ili sličnih konstruktivnih parametara i materijala konstrukcije. Zbog upotrebe specifične vrste čelika, nije postojala mogućnost pronalazaženja odgovarajućeg referentnog modela MR kočnice u literaturi. Zbog toga je odlučeno da se izradi dodatni prototip MR disk kočnice, klasične konstrukcije, sa potencijalom generisanja istog magnetskog polja, pri tom koristeći istu vrstu čelika. Pri projektovanju i izradi oba prototipa MR kočnica, posebno se vodilo računa o istovetnosti osnovnih geometrijskih parametara. Zbog toga je za oba prototipa bilo moguće iskoristiti isti namotaj, čime je garantovan uslov generisanja jednakog magnetskog polja. Sličnošću u konstrukcijama, ostvaren je uslov sličnosti poređenih modela. Tokom merenja kočnih svojstava, kod oba prototipa korišćeni su isti ulazni parametri (broj obrtaja i intenzitet upravljačke struje) i ista vrsta MR tečnosti, BASF Basonetic® 5030 [90].

Nova, unapređena konstrukcija MR disk kočnice – prototip 1, izrađena je u kombinaciji feromagnetskog i paramagnetskog materijala, dok je konstrukcija klasične MR disk kočnice – prototip 2 u potpunosti izrađena od feromagnetskog materijala. Feromagnetski materijal korišćen za izradu elemenata konstrukcije oba prototipa je čelik C15E, dok je za potrebe usmeravanja magnetskog polja kod prototipa 1 odabrana legura aluminijuma AlMgSi0.5. Hemijski sastav odabrane vrste čelika i aluminijuma dat je su u tabeli 6.1. Kompletna tehnička dokumentacija data je u Poglavlju 10.

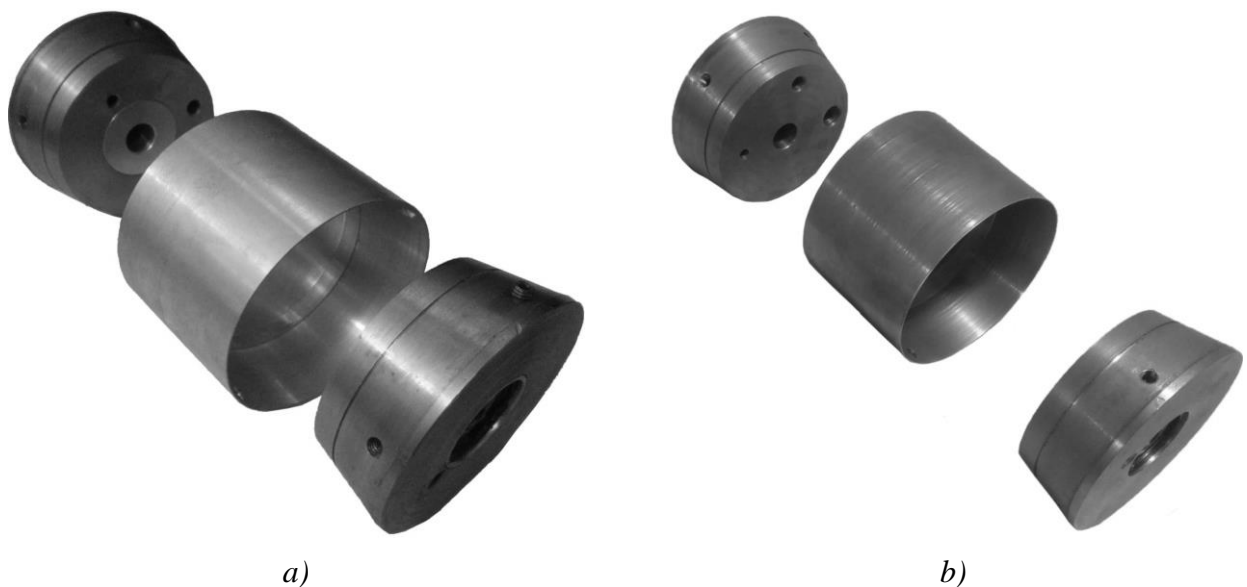
Tabela 6.1. Uporedni prikaz hemijskog sastava materijala korišćenih u izradi prototipa 1 i 2

Hemijski element	C15E, EN 10027, %	AlMgSi0.5, EN AW – 6060 T66, %
C	0,12 – 0,18	-
Mn	0,3 – 0,6	0,1
P	0,035 max	-
S	0,035 max	-
Si	0,4 max	0,3 – 0,6
Cu	-	0,1
Mg	-	0,35 – 0,6
Cr	-	0,05
Zn	-	0,15
Fe	ostatak	0,1 – 0,3
Al	-	ostatak

U prvom delu ovog poglavlja, uporedno su predstavljena oba prototipa MR kočnice, a akcenat je stavljen na razlike u konstrukciji. U drugom delu poglavlja, predstavljen je ispitni sto i prateća oprema korišćena tokom merenja kočnih svojstava oba prototipa.

6.1. Konstrukcija prototipova

Kao i kod preliminarnih prototipova i kod prototipa 1 i prototipa 2, elementi statora predstavljaju zaseban sklop konstrukcije MR kočnice. Statorski sklop oba prototipa sastojao se od tri elementa – dve statorske polovine: stator levi i stator desni i središnjeg prstena tzv. čaure. Na slikama 6.1 a) i b) predstavljeni su elementi statorskih sklopova oba prototipa. Statorske polovine su koničnog oblika kod oba prototipa. U slučaju prototipa 1 statorske polovine su izrađene tako da im je središnji deo od paramagnetskog, a ostatak od feromagnetskog materijala. Međusobno su povezane čaurom napravljenom od paramagnetskog materijala, slika 6.1 a). Spajanje je izvršeno preko zavrtnjeva u četiri tačke (po dve za svaku statorsku polovinu). Koničan oblik statorskih polovina svojim uglom odgovara unutrašnjim uglovima čaure, kod oba prototipa. Ovakav oblik, međusobni odnos i kompozicija statorskih polovina i čaure, omogućio je usmeravanje dela magnetskog polja ka oblasti diska kod prototipa 1.



Slika 6.1. Elementi statorskog sklopa,
a) prototip 1: leva i desna statorska polovina i aluminijumska čaura
b) prototip 2: leva i desna statorska polovina i čelična čaura

Središnji deo statorske polovine prototipa 1, izrađen od paramagnetskog materijala, dodatno usmerava magnetsko polje ka oblasti diska, a dalje od oblasti magnetskog mosta spoja vratilo-disk i delova konstrukcije poput ležajeva i zaptivnih elemenata. Ovako usmereno polje deluje na MR tečnost koja okružuje disk. Kako bi se eliminisala mogućnost eventualnog skretanja magnetskog polja u oblasti spoja vratilo-disk, rotorski sklop prototipa 1, je takođe, izrađen od dve vrste materijala, slika 6.2. U ovom slučaju, vratilo i središnji deo diska su izrađeni od paramagnetskog materijala, dok je obodni deo diska izrađen od feromagnetskog materijala. Prilikom projektovanja rotorskog sklopa prototipa 1, posebno se vodilo računa da središnji delovi rotorskog sklopa i statorskih polovina budu jednaki po prečniku.

U slučaju prototipa 2, rotorski sklop je u potpunosti izrađen od feromagnetskog materijala, slika 6.2. Rešenje za fino podešavanje rotorskog u odnosu na statorski sklop preuzeto je iz drugog preliminarnog prototipa. Navoj finog koraka nalazi se na oba kraja rotorskog sklopa, pa se preko njega i odgovarajućih navrtki aksijalno deluje na položaj diska unutar MR kočnice.

Unutar svake statorske polovine smešteni su odgovarajući kuglični ležajevi, 6000RS (CX), u kombinaciji sa gumenim zaptivnim elementima 7482 (*Suptex*), dimenzija: 10 mm·22 mm·7 mm, zajedno zaduženi za oslanjanje rotorskog sklopa i zaptivanje komornog prostora u oblasti vratila. Pored noseće uloge, statorski sklop ima ulogu formiranja komornog prostora. MR tečnost se komorni prostor sipa kroz otvor izrađen u statorskoj polovini, slika 6.1. Pored ovog otvora, u istoj statorskoj polovini postoji i sekundarni otvor u neposrednoj blizini prvog otvora. Uloga sekundarnog otvora je odzračivanje komornog prostora tokom procesa sipanja MR tečnosti, kako bi se izbeglo stvaranje vazдушnih džepova. Kasnije, tokom merenja kočnog momenta, ovaj otvor ima ulogu kompenzacije pritiska nastalog u komornom prostoru zagrevanjem MR tečnosti. Po sipanju odgovarajuće količine MR tečnosti, prvi otvor se zatvara odgovarajućim zavrtnjem. Kretanje zavrtnja kroz ovaj otvor ka komornom prostoru utiskuje dodatnu količinu MR tečnosti i osigurava da u komornom prostoru postoji samo MR tečnost.



Slika 6.2. Elementi rotorskog sklopa prototipa 1 i prototipa 2

Poslednji element statorskog sklopa je tzv. čaura. Za dva prototipa neophodne su bile dve čaure izrađene od različitih materijala, ali geometrijski jednake. Kod prototipa 1, čaura je izrađena od paramagnetskog, a kod prototipa 2 od feromagnetskog materijala. Uloga čaure kod prototipa 1 je eliminisanje postojanja magnetskog mosta i usmeravanje magnetskog polja ka delu MR tečnosti u oblasti između namotaja i temene oblasti diska. Prilikom projektovanja ovog elementa statorskog sklopa, posebna pažnja posvećenja je debljini zida čaure, kako bi se izbegla mogućnost pre naglašavanja uticaja magnetskog mosta na raspodelu magnetskog polja a ipak zadržala noseća sposobnost elementa. Kako bi se osigurala preciznost pri montaži statorskog sklopa, na većem prečniku obe statorske polovine ostavljen je rub odgovarajuće visine na koji se čaura oslanja u sklopu. Iz ovog razloga, ukupna dužina čaure je neznatno manja od ukupne dužine namotaja. Ukupna dužina statorskog sklopa odgovara ukupnoj dužini namotaja.

Za oba prototipa, koristi se identičan namotaj. Na ovaj način, osigurani su isti parametri za generisanje magnetskog polja tokom obe serije merenja UKM. Da bi se izveo veći broj merenja sa različitim jačinama magnetskog polja, namotaj se sastoji od više manjih namotaja sa po 500 zavojaka vezanih u seriji. Za svaki manji namotaj postoji izvod. Ovo rešenje je pružilo mogućnost upotrebe izvora stabilisanog napajanja manje snage, kakav je korišćen tokom merenja UKM preliminarnih prototipova. Izgled dva namotaja predstavljen je na slici 6.3 a) i b). Razlog postojanja dva namotaja pojašnjen je kasnije u ovom delu teksta.

Osnovne dimenzije i parametri prototipa 1 date su u tabeli 6.2. Način merenja vrednosti reaktivnog momenta odnosno UKM za oba prototipa je preuzet od preliminarnih prototipova

(putem merne poluge). Ovakvo rešenje se u prethodnim merenjima pokazalo kao vrlo jednostavno, robustno, ali i efikasno. Kod oba prototipa, korišćena je ista merna poluga, koja je jednim svojim krajem konzolno vezana na levu statorsku polovinu, a drugim krajem oslonjena na mernu čeliju.

Tabela 6.2. Parametri konstrukcije prototipa 1 i prototipa 2.

Parametar	Prototip 1	Prototip 2
Spoljašnji prečnik tela MR kočnice, mm	72	72
Ukupna dužina tela MR kočnice, mm	60	60
Ugao statorske polovine, °	11	-
Spoljašnji prečnik diska, mm	60	60
Prečnik aluminijskog središta diska, mm	27	-
Debljina diska, mm	5	5
Spoljašnji prečnik čaure, mm	72	72
Unutrašnji prečnik aluminijske čaure, mm	61	-
Unutrašnji prečnik čelične čaure, mm	-	61
Ukupna dužina aluminijske čaure, mm	54	
Ukupna dužina čelične čaure, mm	-	54
Prečnik vratila, mm	10	10
Ukupan zazor MR tečnosti, mm	1	1
Ukupna zapremina MR tečnosti, mm ³	≈ 10	≈ 10
Upravljačka struja namotaja, <i>max</i> , A	1	1
Prečnik bakarne žice, mm	0,7	0,7
Unutrašnji prečnik namotaja, mm	72	72
Spoljašnji prečnik namotaja, mm	≈ 152	≈ 152
Ukupna dužina namotaja, mm	60	60
Ukupan broj zavojaka namotaja, -	3600	3600

Statorski sklop prototipa 2 takođe se sastoji od tri elementa: dve statorske polovine i čaure. Za razliku od prototipa 1, elementi statorskog sklopa prototipa 2 su u potpunosti izrađeni od feromagnetskog materijala, C15E. Sa stanovišta magnetskog kola, konstrukcija ovog statorskog sklopa može se posmatra kao jedinstven element konstrukcije MR disk kočnice. Specifičan oblik ovog sklopa čini da je magnetsko polje jače u oblasti čaure nego što je to slučaj u oblasti statorskih polovina. Ovakva konfiguracija statorskog sklopa pruža uslove za formiranje već pomenutog magnetskog mosta u okolini temene površine diska MR kočnice, i za smanjenje uticaja magnetskog polja na MR tečnost. Tokom projektovanja, odlučeno je da način spajanja elemenata statorskog sklopa bude identičan kao i u slučaju prototipa 1, čime je značajno pojednostavljen proces izrade elemenata, ali i smanjen obim tehničke dokumentacije. Dodirne površine statorskih polovina i čaure izvedene su pod identičnim uglom, pa nema prisustva zazora među njima. Elementi statorskog sklopa prototipa 2 prikazani su na slici 6.1. b). Oslanjanje rotorskog sklopa i zaptivanje komornog prostora izvedeno je identično kao kod prethodnog prototipa. Korišćen je isti tip kugličnih ležajeva i zaptivnih elemenata. Rešenje punjenja MR tečnosti primenjeno kod prototipa 1, pokazalo se kao vrlo efikasno, pa je primenjeno i kod prototipa 2. Za ovu svrhu, postignut je skoro identičan raspored otvora na levoj statorskoj polovini. Izrada otvora u ovom slučaju bila je znatno olakšana

zato što u ovoj konfiguraciji ne postoje središnji delovi napravljeni od paramagnetskog materijala, kao u slučaju prototipa 1.

Rotorski sklop prototipa 2 je, prema geometrijskim parametrima, identičan rotorskom sklopu prototipa 1. Razlika između ova dva rotorska sklopa je u tome što je rotorski sklop prototipa 2 u potpunosti izrađen od feromagnetskog materijala, C15E, slika 6.2. Ovako formirana MR disk kočnica se može posmatrati kao feromagnetsko jezgro elektromagneta jednosmerne struje. Zbog prisustva MR tečnosti u konstrukciji MR kočnice, izražen je efekat skretanja magnetskog polja od oblasti diska.

Tokom probnog merenja UKM prototipa 1, došlo je do havarije na MR kočnici. Oštećenje je zahvatilo čauru, manji deo desne statorske polovine i namotaj. Kasnijim ispitivanjem, utvrđeno je da je lak izolacija bakarnih provodnika nepažnjom oštećena. Ovo oštećenje je, preko aluminijumskog tela čaure, namotaj dovelo u kratak spoj. Havarija je u potpunosti uništila namotaj i aluminijumsku čauru, pa su morali biti zamenjeni. Novi zamenski namotaj prikazan je na slici 6.3 b).



Slika 6.3. Namotaji prototipa magnetoreološke kočnice, a) prvi namotaj, b) drugi – zamenski namotaj



Slika 6.4. Izgled oštećene aluminijumske čaure

Na slici 6.4, prikazana je oštećena čaura. Posle ovog akcidenta, novi zamenski namotaj je na prototipove MR kočnica postavljan uz dodatak tankog papirnog omotača unutar namotaja. Njegova uloga je bila da zaštiti osetljivu lak izolaciju bakarnih provodnika namotaja, slika 6.3 b).

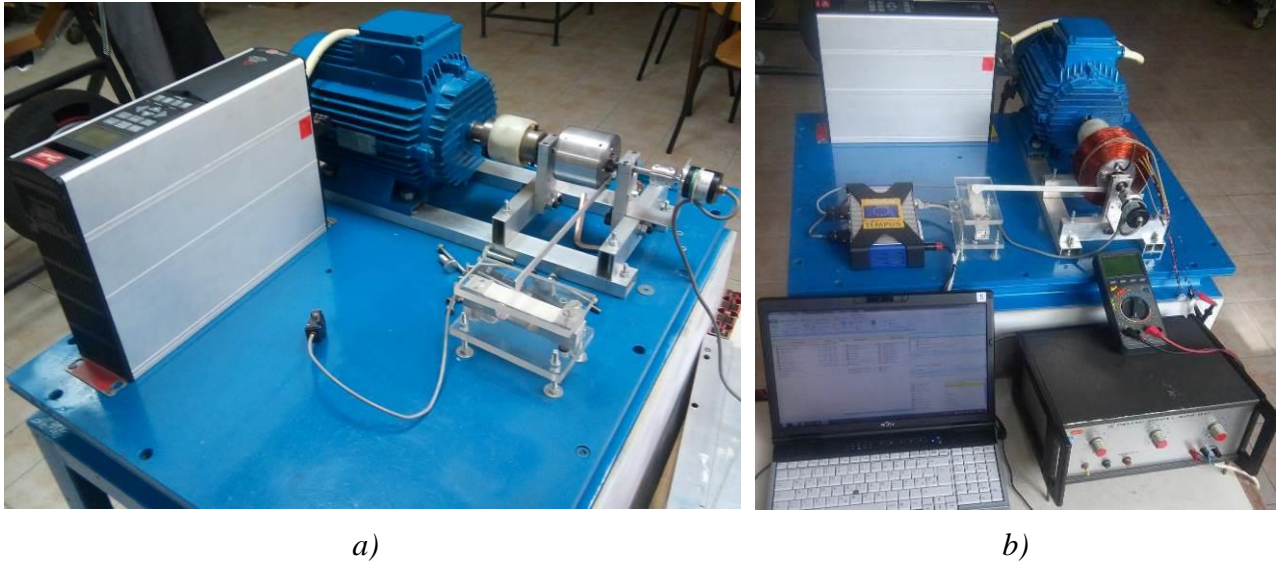
6.1.1. Ispitni sto i merenje ukupnog kočnog momenta

Za potrebe merenja vrednosti komponenti UKM prototipova 1 i 2, izvršena je adaptacija ispitnog stola prethodno korišćenog za potrebe merenja vrednosti komponenti UKM preliminarnog prototipa 2. Zbog dobro razrađenog sistema merenja na tom ispitnom stolu, proverenog u više serija merenja, nije bilo potrebe za daljim unapređenjem ili prevazilaženjem nepredviđenih problema. Korišćen je isti princip indirektnog merenja kočnog momenta. Ipak, dodatna pažnja je ovog puta posvećena eliminisanju negativnog uticaja vibracija na rezultate merenja. Tokom rada ispitnog stola, deo vibracija generiše se radom elektromotora, pa se na njihovo umanjeње teže može uticati. Najveći deo vibracija tokom rada ispitnog stola potiče od nesaosnosti vratila elektromotora i vratila MR kočnice. Deo ove nesaosnosti moguće je kompenzovati upotrebom elastične spojnice, ali postoje ograničenja u kojoj meri je to moguće. Zbog toga se, prilikom ponovnog sastavljanja noseće konstrukcije ispitnog stola, dodatna pažnja posvećena je tačnosti pozicija svih komponenti, a posebno međusobnom odnosu noseće konstrukcije i elektromotora i međusobnom odnosu elektromotora i novoizrađenih nosača MR kočnice koji se oslanjaju na noseću konstrukciju, slika 6.5. Nosači MR kočnice izrađeni su tako da prihvataju ležajeve 608-2RSR, (FAG). Pored međusobnog odnosa elemenata noseće konstrukcije, pažnja je posvećena povećanju mase fundamenta ispitnog stola, što je takođe imalo pozitivan uticaj na smanjenje vibracija. Ovim postupcima uticaj vibracija tokom merenja sveden je na minimum. Međusobni odnos elemenata ispitnog stola i njihova postavka, ilustrovani su na slikama 6.5 a) i b).

Za elektromotorni pogon ponovo je iskorišćen provereni osmopolni asinhroni zatvoreni kavezni motor, model 5 AZ 100 LA-8 (Končar), snage 0,75 kW i nazivne brzine od 700 o/min. Upravljanje elektromotorom je takođe ponovo vršeno preko frekventnog pretvarača, VLT 5400 (Danfoss). Broj obrtaja vratila MR kočnice predviđen je u rasponu od 100 o/min do 700 o/min i podeljen je na segmente od po 50 o/min. Merenje broja obrtaja je vršeno enkoderom, AMT102-V-REV-C (CUI INC), učestanošću uzorkovanja od 2048 uzoraka u sekundi. Variranje broja obrtaja je vršeno frekvencijski.

Zbog parametara novog namotaja javila se potreba za izvorom stabilisanog napona veće snage. Vrednost upravljačke struje namotaja ovog puta je kontrolisana izvorom stabilisanog napona, NE 137 (Iskra), radnog naponskog i strujnog opsega od 0 do 60 V i od 0 do 2,5 A, respektivno. Upravljačka struja je inkrementalno varirana u rasponu od 0 do 1 A, korakom od 0,2 A. Dodatna kontrola vrednosti upravljačke struje vršena je baždarenim digitalnim multimetrom, M-4660 A, (Voltcraft), postavljenim između izvora stabilisanog napona i namotaja. Nakon svakog uspostavljanja upravljačke struje kroz namotaj, generisano je magnetsko polje u telu MR kočnice. Po prestanku delovanja magnetskog polja, efekti zaostalog magnetizama su eliminisani postupkom razmagnetisavanja. Za potrebe razmagnetisavanja, korišćen je izvor naizmjenične struje, koja je postepeno uspostavljena kroz namotaj MR kočnice preko reostata sa klizačem: 0,4 A, 1000 Ω , (MII-PC Φ CP). Struja je uspostavljena od minimalne vrednosti otpornosti reostata, pa sve do vrednosti otpora od približno 60 Ω i ponovo prema minimalnoj vrednosti otpornosti.

Reaktivni kočni moment, generisan na statoru, se preko merne poluge prenosi na mernu ćeliju, model 1030 (VPG Transducers). Korišćena poluga istih je parametara kao i u slučaju merenja preliminarnih prototipova. Pre svake serije merenja, tačnost merne ćelije proverena je baždarenim tegovima. Usvojen je postupak merenja vrednosti komponenti UKM, korišćen u slučaju preliminarnog prototipa 2.

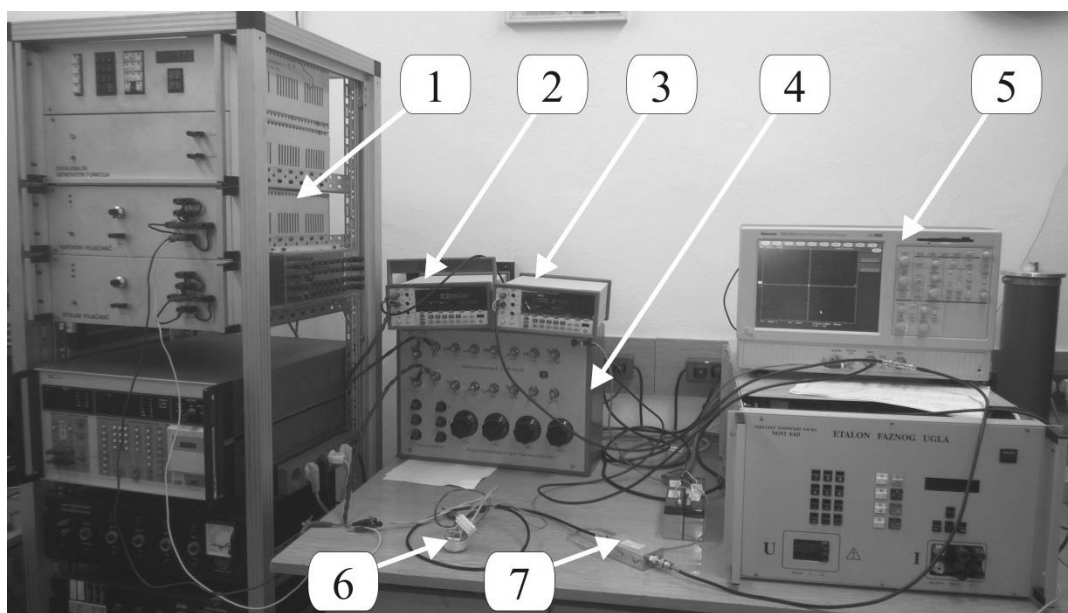


Slika 6.5. Postavka ispitnog stola prototipova 1 i 2,
a) osnovna postavka ispitnog stola, b) finalna postavka ispitnog stola sa svim elementima

Za oba prototipa (prototip 1 i prototip 2), izvršeno je merenje vrednosti svake komponente UKM ponaosob. Prvo je izvršeno merenje vrednosti frikционе komponente za svaki broj obrtaja. Potom je u MR kočnicu dodata MR tečnost i izvršeno merenje vrednosti sume frikciono-viskozne komponente. Po uspostavljanju upravljačke struje u namotaju izmerene su vrednosti UKM za svaku kombinaciju upravljačke struje i broja obrtaja. Za svaki broj obrtaja, vrednost frikционе komponente merena je u trajanju od najmanje 15 s. Merenja vrednosti preostale dve komponente izvršeno je u serijama od po tri merenja za svaki broj obrtaja i svaku kombinaciju broj obrtaja-upravljačka struja. Izmerene vrednosti, dobijene sa enkodera i merne ćelije, slate su na sistem za akviziciju podataka, Quantum MX840A (HBM). Prikupljene izmerene vrednosti komponenti UKM i brojeva obrtaja su potom na računaru softverski obrađene i izvežene u odgovarajući elektronski format. Za obradu izmerenih vrednosti na računaru, korišćen je komercijalni softver catmanEasy, ver. 3.5.1.48 (HBM). Krajnji rezultati merenja predstavljeni su u obliku zavisnosti promene momenta, za sve tri komponente UKM.

6.2. Merna instalacija za merenje magnetskih svojstava predloženih vrsta čelika

Merenja vrednosti magnetskih svojstava predloženih uzoraka čelika obavljena su u Kalibracionoj laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu na konstantnoj temperaturi od 22°C. Merni sklop prikazan je na slici 6.6, dok su svi rezultati merenja predstavljeni u poglavlju 7. Uzorci su napajani iz električne mreže, preko rastavnog regulacionog transformatora. Jačina struje primara merena je preciznim univerzalnim instrumentom, 8846A multimeter (*Fluke*). Elektronski integrator po vremenu, konstruisan u istoj laboratoriji i napajan je iz akumulatora vremenski konstantne elektromotorne sile ± 12 V. Napon na izlazu integratora meren je dodatnim instrumentom 8846A multimeter (*Fluke*). Snimanja su izvršena na osciloskopu TDS 5032 Digital Phosphor Oscilloscope, (*Tektronix*). Tokom snimanja histerezisnih petlji, vrednosti otpornosti i kapacitivnosti prema električnoj šemi, slika 3.8, su $R_1=10 \Omega$, $R_2=15 \text{ k}\Omega$ i $C=2 \mu\text{F}$.



Slika 6.6. Postavka merne instalacije za snimanje dinamičke histerezisne krive,
1 – kalibrator, 2 i 3 – multimetri, 4 – otpornik, 5 – osciloskop,
6 – merni transformator, 7 – integrator

Efektivna vrednost jačine struje magnetisanja, odnosno prostoperiodične struje primara frekvencije 50 Hz, proporcionalna je intenzitetu vektora jačine magnetskog polja, jednačina (3.23), i vođena je na horizontalnu osu osciloskopa, slika 3.8. Pad napona na kondenzatoru, jednačina (3.29), predstavlja napon na izlazu operacionog pojačavača, tj. elektronskog integratora po vremenu i proporcionalan je vrednosti magnetske indukcije. Ovaj napon vođen je na vertikalnu osu osciloskopa, slika 3.8. Histerezisna petlja formirana na ovaj način prikazana je na ekranu osciloskopa i snimljena sa učestalošću uzorkovanja od približno 5000 uzoraka u sekundi u fajl na eksternoj memoriji osciloskopa.

7. Rezultati i diskusija

U ovom delu rada predstavljeni su svi rezultati merenja obavljenih tokom ovog istraživanja. Rezultati su predstavljeni tabelarno i grafički i podeljeni su u tri potpoglavlja. U prvom potpoglavlju predstavljeni su rezultati merenja magnetskih svojstava dva uzorka različitih vrsta čelika pogodnih za izradu konstrukcije MR kočnice. U prvom redu, to su rezultati familija histerezisnih krivih a zatim i rezultati krivih prvobitnog magnetisanja, za oba uzorka. Drugo potpoglavlje daje prikaz rezultata merenja vrednosti komponenti UKM svih prototipova predstavljenih u ovom radu. Koeficijent determinacije iskazan je na svakom dijagramu. Poslednje potpoglavlje posvećeno je verifikaciji rezultata UKM prototipova 1 i 2 metodom konačnih elemenata, putem određivanja parametara magnetskog polja. Na osnovu ovih parametara, određene su numeričke vrednosti komponenti UKM i upoređene sa stvarnim rezultatima merenja. Pojedine numeričke vrednosti rezultata merenja, zbog svog obima, date su i u poglavlju 10.

7.1. Rezultati merenja magnetskih svojstava predloženih vrsta čelika

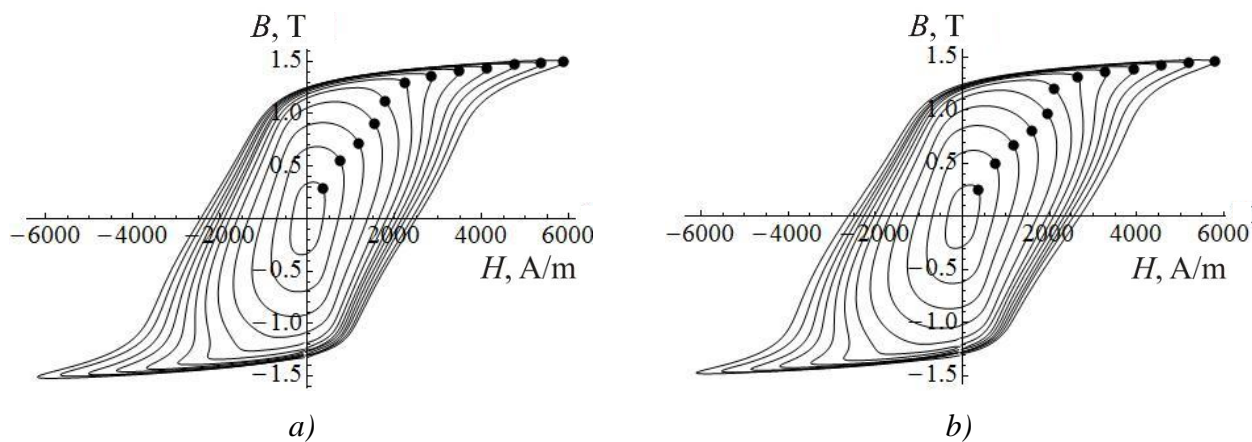
Merenje magnetskih svojstava vršeno je za dve vrste čelika, C15E i 11SMn30. Hemijski sastav obe vrste dat je u tabeli 3.3 u potpoglavlju 3.3. Uzorci čelika su obrađeni u oblik torusa i na njih je namotan određeni broj zavojaka primara i sekundara (parametri dati u tabeli 3.4). Ovako formirani merni transformatori iskorišćeni su za određivanje familije histerezisnih krivih, normalnih krivih magnetisanja, permeabilnosti i krivih prvobitnog magnetisanja. Kao najznačajniji za postupak konstruisanja MR kočnice, izdvojeni su i u nastavku teksta prikazani rezultati familija histerezisnih krivih, normalnih krivih magnetisanja i krivih prvobitnog magnetisanja.

7.1.1. Familija histerezisnih krivih

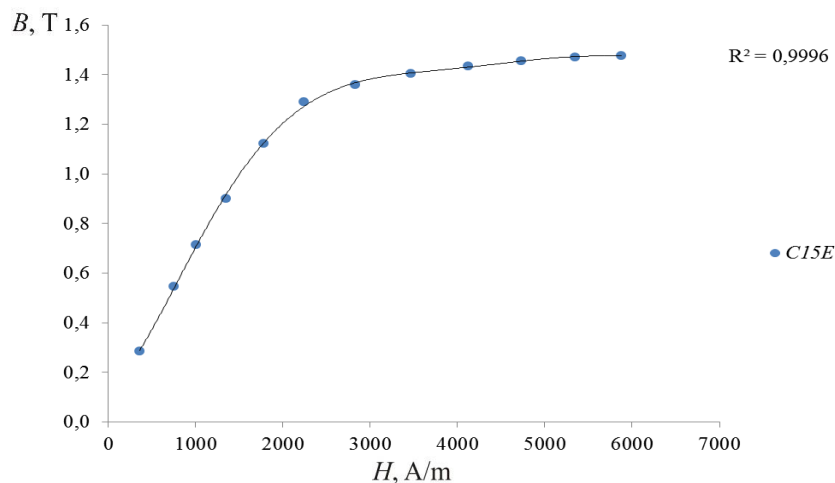
Da bi se odredila familija histerezisnih krivih, neophodno je snimiti više pojedinačnih histerezisnih krivih za različite vrednosti jačine prostoperiodične struje primara. Postupak određivanja oblika histerezisnih petlji predstavljen je u potpoglavlju 3.3.1, električna šema data na slici 3.8, a postavka mernog sklopa na slici 6.6. Rezultantne vrednosti magnetskog polja i indukcije za oba uzorka date su, na kraju ovog dela teksta, u tabeli 7.1. Raspon promene struje primara bio je od 50 mA do 600 mA, sa korakom od 50 mA. Ovo su bile efektivne vrednosti jačine struja primara. Dobijene vrednosti magnetskog polja i magnetske indukcije za obe vrste čelika, ilustrovane su u obliku familije histerezisnih petlji na slikama 7.1 a) i b). Na svakoj pojedinačnoj histerezisnoj petlji sa slika 7.1 a) i b), postoji tačka koja predstavlja maksimalni proizvod intenziteta vektora magnetskog polja i magnetske indukcije. Spajanjem tih tačaka dobija se normalna kriva magnetisanja. Normalne krive magnetisanja oba uzorka, date su na slikama 7.2 i 7.3.

Rezultati merenja pokazali su da između ova dva uzorka čelika nema velike razlike u pogledu konačnih oblika histerezisnih petlji i površina koju one pokrivaju a za razmatranu frekvenciju struje primara i vrednosti ulaznih parametara. Slična situacija postojala je i kod rezultata normalnih krivih magnetisanja. Isti numerički postupak ponovo je primenjen i na ovom setu rezultata. Kriva dobijena ovim postupkom ima prepoznatljiv i karakterističan oblik. Koeficijent determinacije, koji predstavlja relativnu meru i prikazuje učešće objašnjenog varijabiliteta u ukupnom varijabilitetu [146], u oba slučaja (C15E i 11SMn30) ima vrednost veću od 0,98. Na

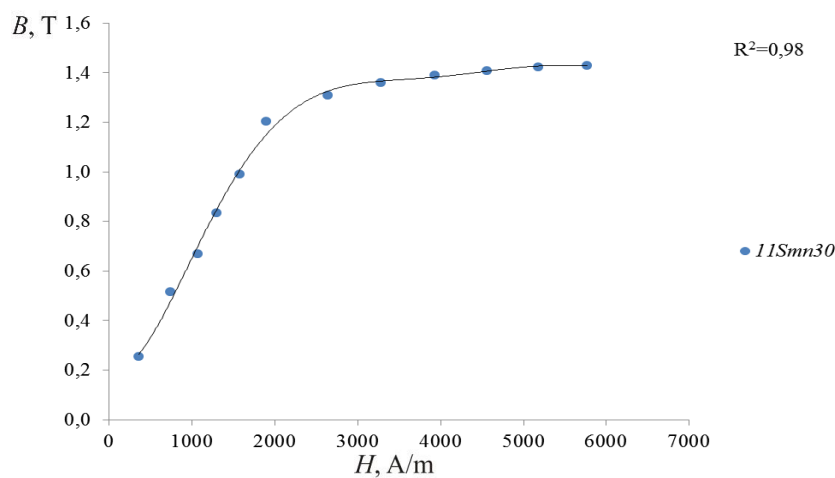
osnovu toga, može se reći da predložena normalna kriva magnetisanja u najvećoj meri vrlo dobro opisuje varijaciju dobijenih rezultata merenja u oba slučaja.



Slika 7.1. Familija histerezisnih krivih za:
a) uzorak čelika C15E i b) uzorak čelika 11SMn30



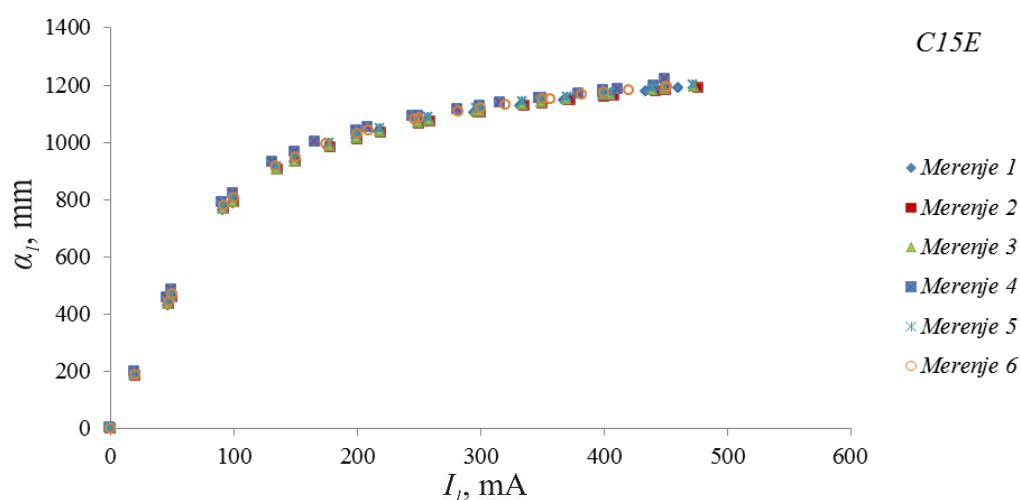
Slika 7.2. Rezultati određivanja normalne krive magnetisanja za C15E



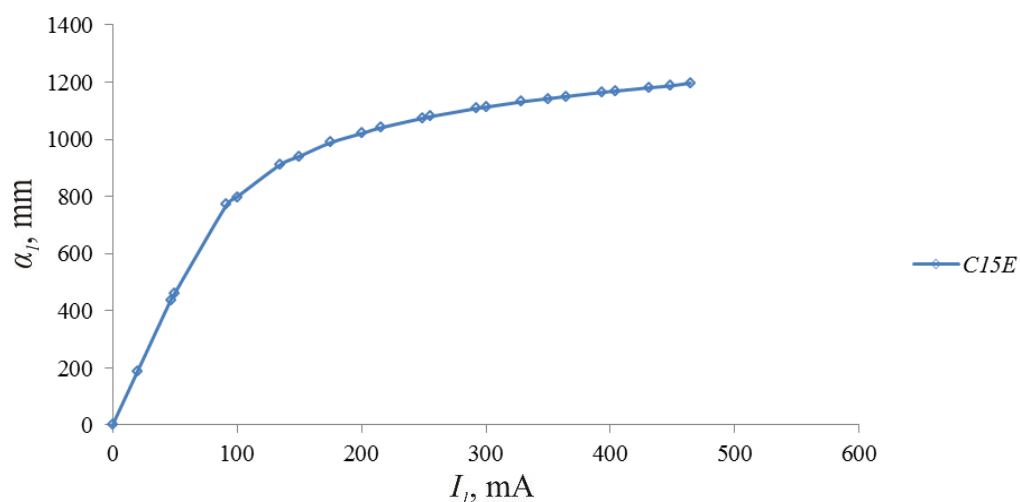
Slika 7.3. Rezultati određivanja normalne krive magnetisanja za 11SMn30

7.1.2. Kriva prvobitnog magnetisanja

Na osnovu šest serija merenja izvršenih prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.3.2, dobijene su vrednosti struja primara, I_1 , i balističkih otklona, α_1 , za oba merna transformatora. Računskim postupkom [125] određene su i vrednosti balističkih konstanti: za C15E – 4,34 V·s/mm a za 11SMn30 – 3,98 V·s/mm. Prema jednačinama (3.24) i (3.32), određene su vrednosti B i H . Rezultati merenja predstavljeni su grafičkim putem. Prvo su predstavljeni rezultati merenja $I_1 - \alpha_1$, 7.4 a) i 7.5 a), a potom i $H-B$, 7.6 a) i 7.7 a). Rezultati su pokazali vrlo dobru ponovljivost i mali stepen disperzije izmerenih vrednosti, te dodatna obrada nije bila potrebna. Na osnovu ovako dobijenih vrednosti, metodom određivanja aritmetičke sredine, određeni su finalni oblici svih krivih, $I_1 - \alpha_1$ i $H-B$, i grafički predstavljene na slikama: 7.4 b), 7.5 b) i 7.6 b), 7.7 b), respektivno.

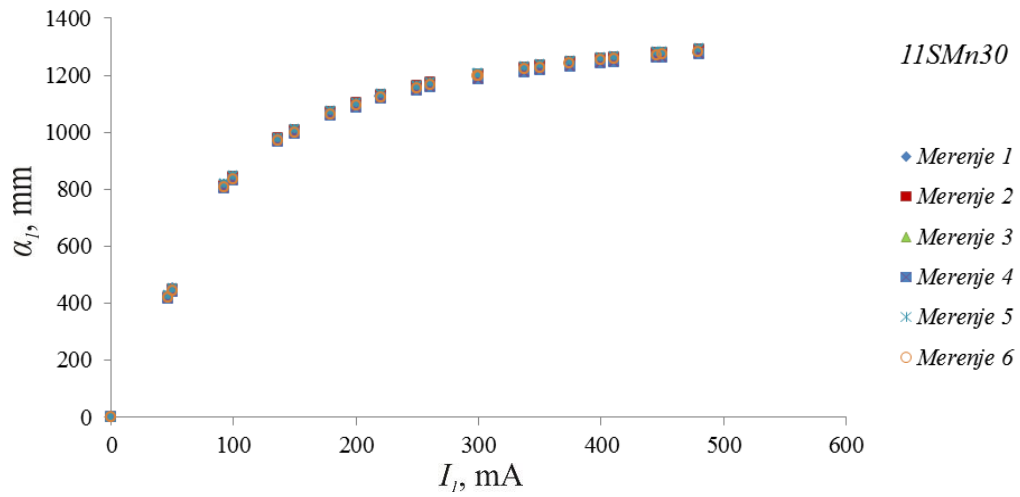


a)

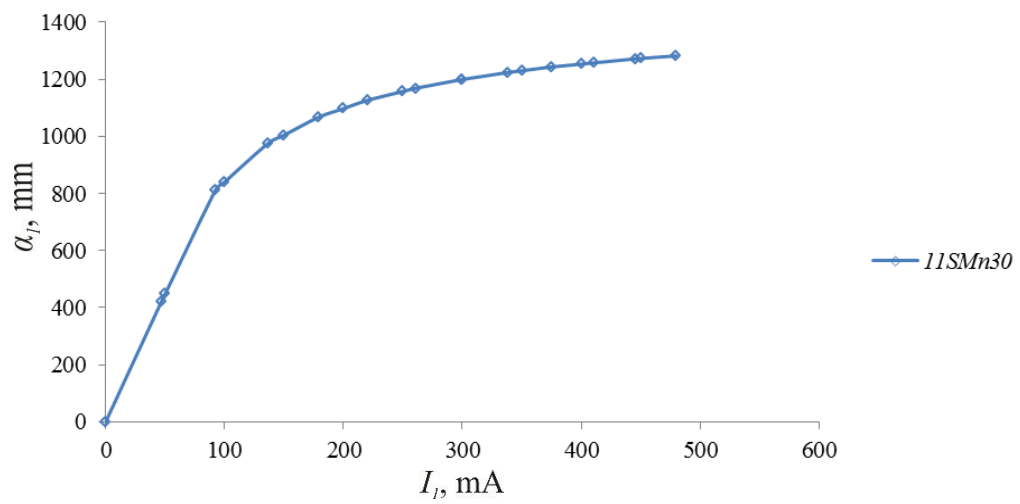


b)

Slika 7.4. Odnos struje primara i balističkog otklona uzoraka C15E, a) izmerene vrednosti, b) aritmetička sredina izmerenih vrednosti

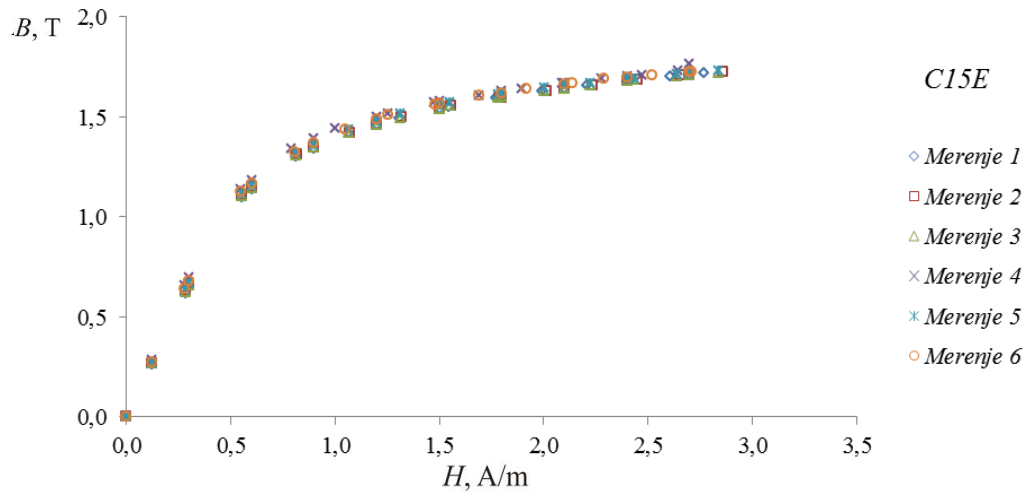


a)

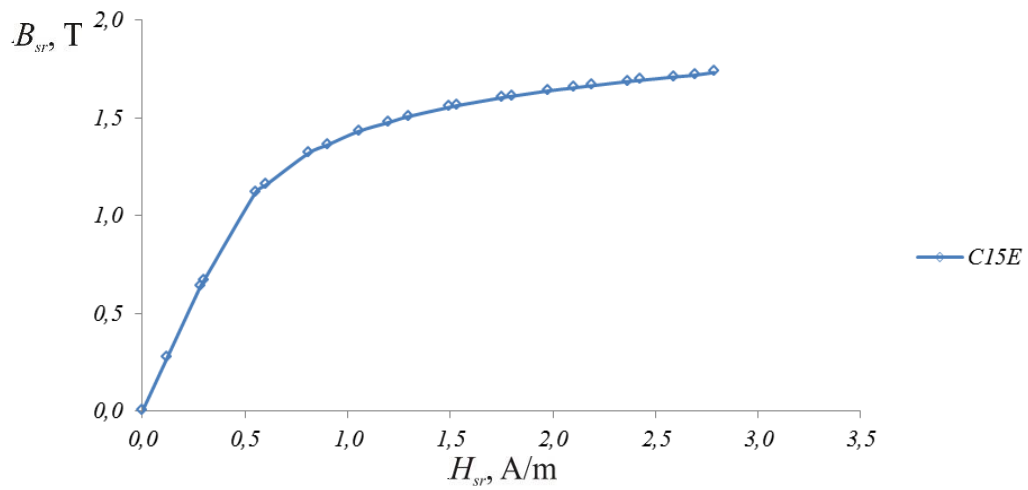


b)

Slika 7.5. Odnos struje primara i balističkog otklona uzoraka 11SMn30, a) izmerene vrednosti, b) aritmetička sredina izmerenih vrednosti

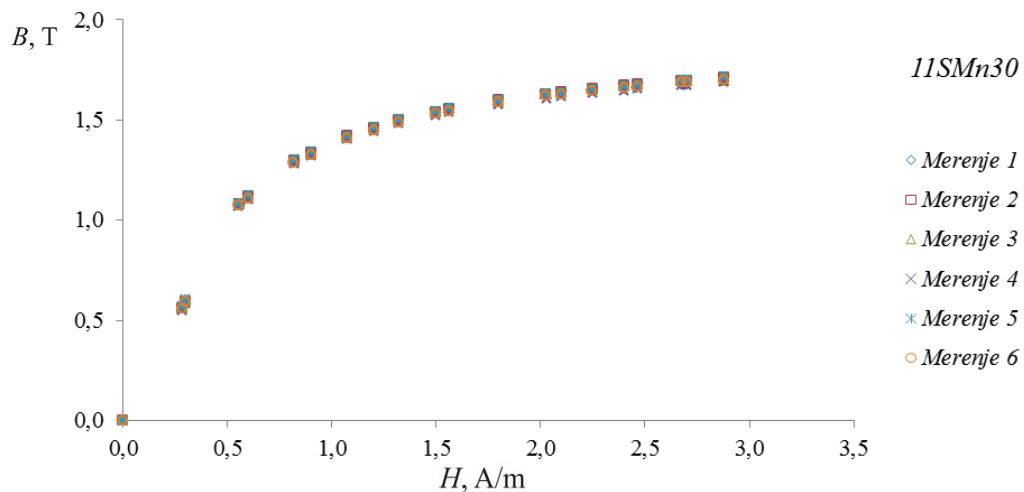


a)

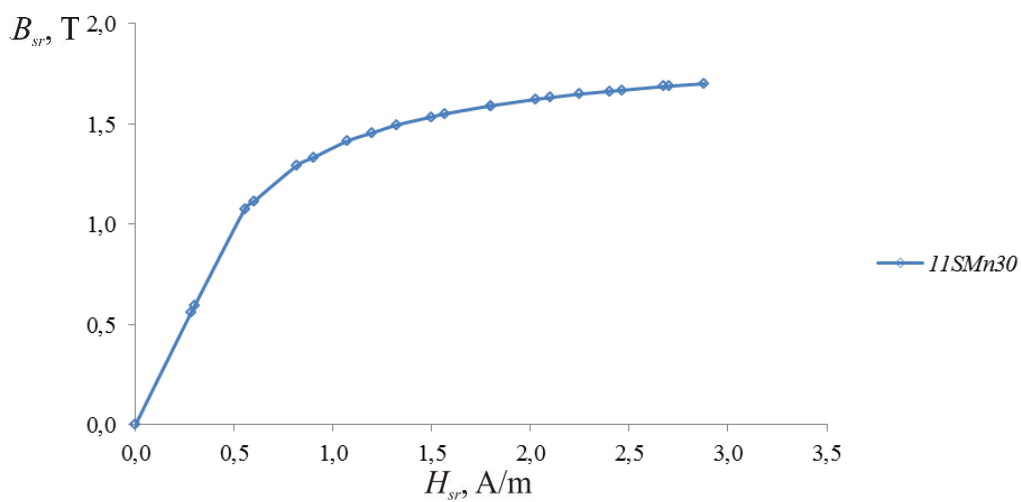


b)

Slika 7.6. Kriva prvobitnog magnetisanja uzoraka C15E,
a) 6 serija merenja, b) aritmetička sredina



a)



b)

Slika 7.7. Kriva prvobitnog magnetisanja uzoraka 11SMn30, a) 6 serija, b) aritmetička sredina

Analizom dobijenih rezultata, može se zaključiti da ne postoje značajnije razlike između predloženih vrsta čelika, niti parametar koji bi jednu vrstu čelika isticao kao povoljniju za primenu u izradi tela MR uređaja. Zbog toga, odlučeno je da se za materijal konstrukcije odabere čelik C15E za koji je postojala veća mogućnost pribavljanja u različitim prečnicima sirovog materijala, što je pojednostavilo izradu prototipova. Čelik 11SMn30 je bilo teže pronaći na tržištu i postojala su određena ograničenja po pitanju dostupnih prečnika sirovog materijala.

Tabela 7.1. Vrednosti struje primara, napona sa integratora i promene rezultatnih vrednosti H i B tokom snimanja familije histerezisnih petlji uzoraka C15E i 11SMn30, pri frekvenciji od 50 Hz

Frekvencija 50 Hz		C15E			11SMn30		
Korak	i_1 [mA]	U_1 [V]	H [A/m]	B [T]	U_2 [V]	H [A/m]	B [T]
1.	50	69,91	361,26	0,29	60,07	359,76	0,25
2.	100	139,33	753,69	0,55	126,00	758,15	0,50
3.	150	188,49	1000,32	0,71	173,42	1169,46	0,67
4.	200	226,02	1350,26	0,90	210,65	1590,81	0,80
5.	250	252,61	1780,96	1,12	240,64	1933,84	0,97
6.	300	270,33	2243,94	1,29	260,59	2101,35	1,20
7.	350	281,55	2827,86	1,36	272,97	2640,63	1,31
8.	400	290,13	3467,15	1,40	281,60	3279,15	1,36
9.	450	297,29	4119,74	1,43	288,28	3936,75	1,32
10.	500	303,08	4734,09	1,46	293,88	4561,41	1,42
11.	550	307,88	5352,03	1,48	298,93	5182,94	1,44
12.	600	312,72	5877,17	1,50	302,93	5772,97	1,46

7.2. Rezultati merenja ukupnog kočnog momenta

Na osnovu merenja vrednosti komponenti UKM obavljenih za dva preliminarna i dva finalna prototipa MR disk kočnica, prikupljeni su, obrađeni i predstavljeni rezultati za svaki prototip ponaosob. Promene vrednosti komponenti UKM predstavljene su kao odnos broja obrtaja i momenta za svaku vrednost upravljačke struje posebno. Na osnovu dobijenih rezultata, određene su srednje aritmetičke vrednosti kočnih momenata. Zbog prisustva određenog stepena disperzije ovih rezultata, primenjen je postupak linearne regresije. Nove formirane krive imaju linearni monotono rastući karakter. Vrednost koeficijenta determinacije za sve krive linearne regresije uvek je preko 0,90, a često i preko 0,98.

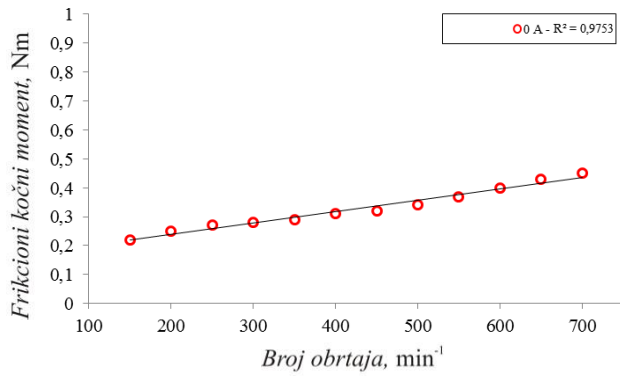
7.2.1. Prvi preliminarni prototip

Za svaki broj obrtaja vratila, prvog preliminarnog prototipa MR kočnice, i svaku vrednost upravljačke struje, urađena je serija od po 5 merenja vrednosti odgovarajuće komponente UKM. Serije merenja trajale su i do 120 s u zavisnosti od merene komponente.

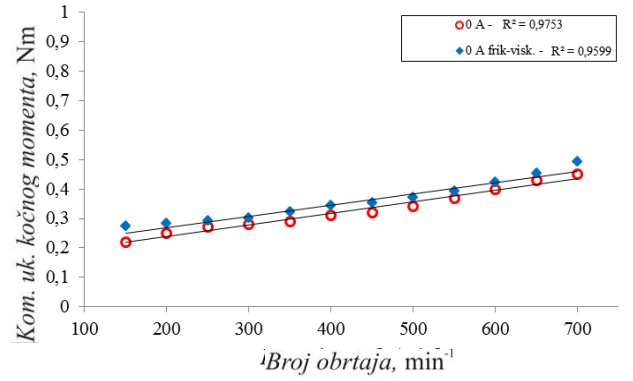
Prvo je merena vrednost frikcione komponente, a potom i vrednosti frikciono-viskozne komponente UKM u punom opsegu broja obrtaja. Na osnovu ovih merenja, određene su srednje vrednosti momenta za svaki broj obrtaja. Rezultati ovih komponenti UKM predstavljeni su na slikama 7.8 a) i b). Postupkom linearne regresije, dobijen je linearan oblik krive jasno monotono rastućeg karaktera. Ovakva linearna promena je i očekivana. Izmerena vrednost frikciono-viskozne komponente, neznatno je veća od vrednosti čisto frikcione komponente. Ovo je očekivano, zbog uticaja otpora tečnosti nosioca i feromagnetskih čestica u MR tečnosti na povećanje otpora kretanja rotora.

Nakon ovih serija merenja, pristupilo se merenju vrednosti sume tri komponente UKM, odnosno određivanju vrednosti indukovane komponente UKM. Sa inkrementalnim porastom vrednosti upravljačke struje, izmerena je vrednost UKM za svaki broj obrtaja. Primenjen je isti postupak obrade rezultata kao i u prethodna dva slučaja, a dobijeni rezultati predstavljeni su na slikama 7.8 c) – l) Ponovo je primetan monotono rastući karakter dobijenih krivih, što je takođe očekivano. Ipak ugao porasta svih krivih je mali, (približno nekoliko stepeni za sva merenja), pa se, na osnovu toga, može reći da su promene vrednosti momenta monotono rastućeg karaktera u odnosu na promenu broja obrtaja.

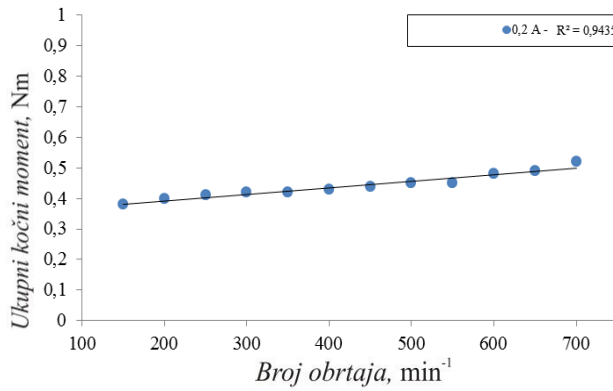
Primećeni su sporadična manja ili veća odstupanja od trenda vrednosti komponenti UKM. Razlog je povećanja temperature tokom rada, ali i povremeni mali gubici MR tečnosti iz komornog prostora. Kako bi se smanjio uticaj ove dve pojave, merenja su vršena kombinovano, prvo u opsegu nižih brojeva u kombinaciji sa većim intenzitetom upravljačke struje (što je dovodilo do značajnijeg zagrevanja konstrukcije) a potom su merenja vršena za veće brzine obrtanja i manje intenzitete upravljačke struje. Tokom merenja, primenjeno je i prinudno hlađenje MR kočnice, što je imalo pozitivan uticaj na smanjenje radne temperature MR tečnosti. Svi ovo postupci vršeni su u cilju obezbeđivanja što ravnomernijeg zagrevanja tela MR kočnice, ali i ravnomernijeg raspoređivanja feromagnetskih čestica.



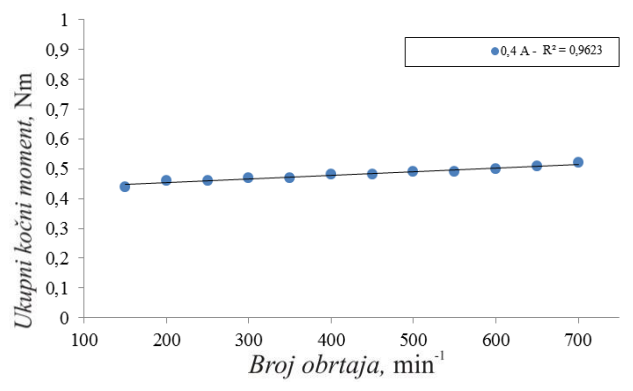
a)



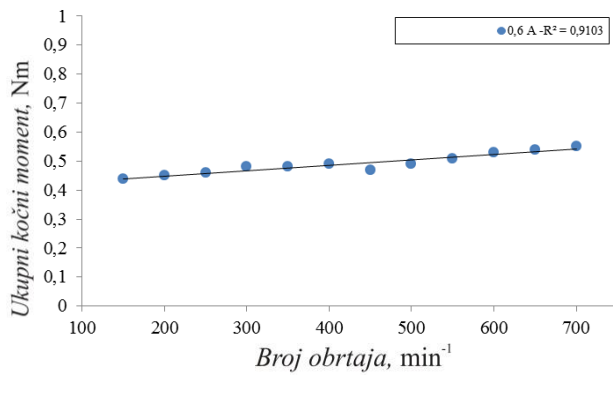
b)



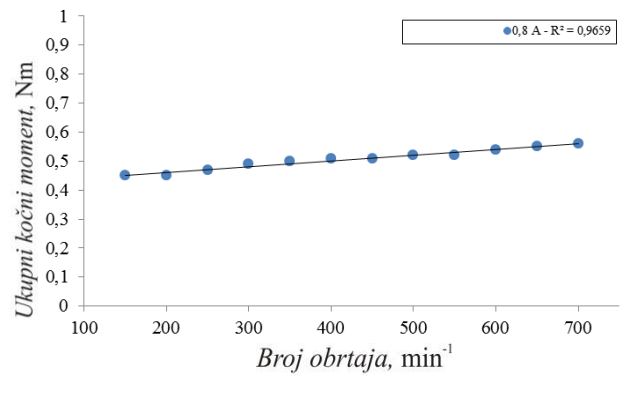
c)



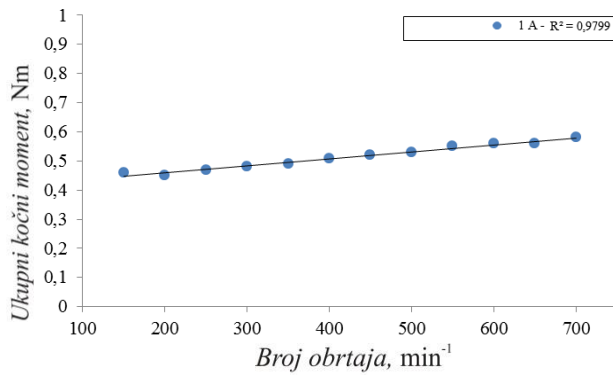
d)



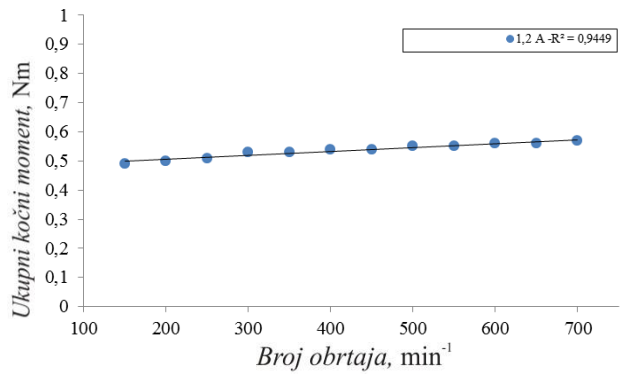
e)



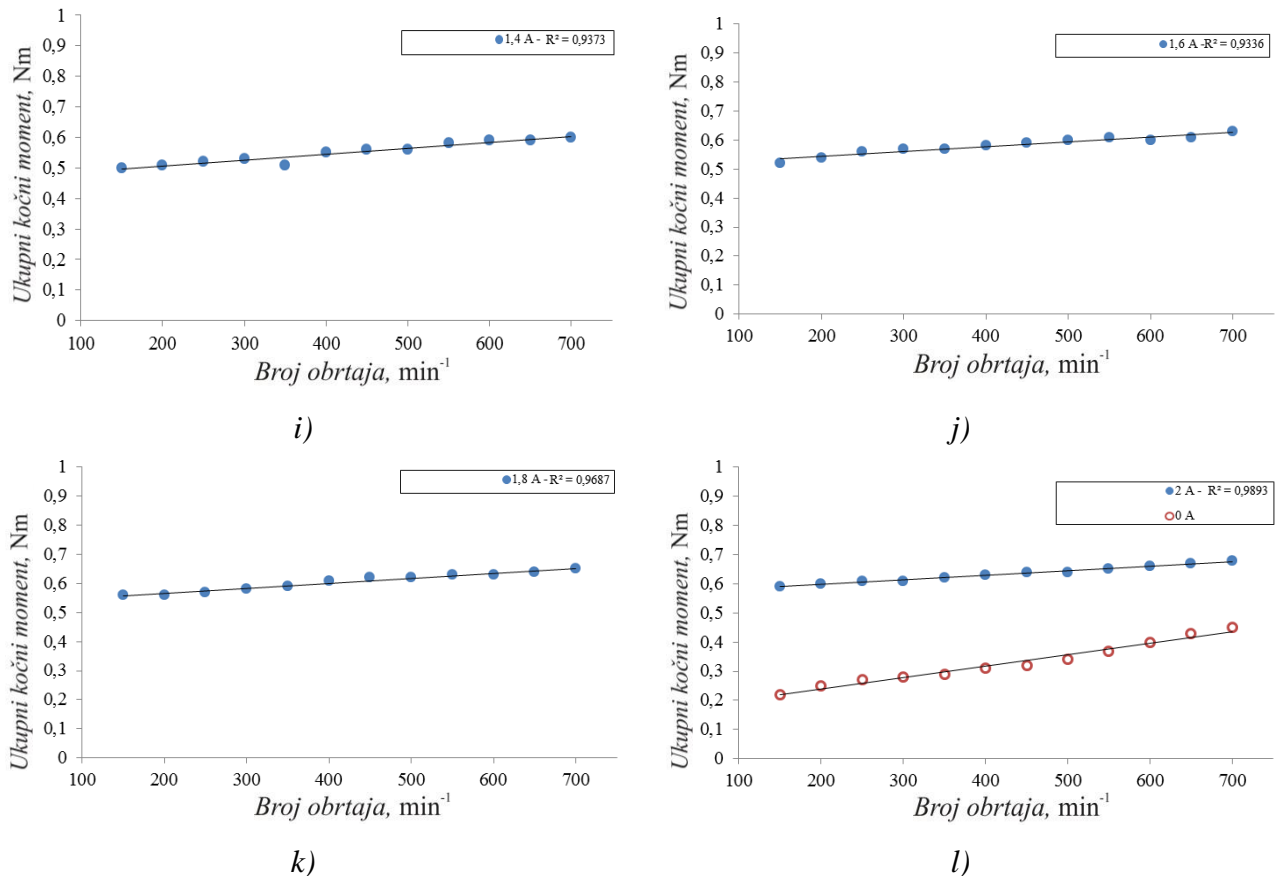
f)



g)



h)



Slika 7.8. Promena vrednosti komponenti UKM prvog preliminarnog prototipa

Prosečne vrednosti standardne devijacije i greške merenja, ustanovljene u procesu obrade dobijenih rezultata, iznosile su oko 0,02 i 0,50%, respektivno. Greška merenja pojedinačnih vrednosti kočnih momenata je utvrđena metodom relativne standardne devijacije. U slučaju merenja vrednosti frikcione i frikciono-viskozne komponente UKM, greška merenja je utvrđena za ceo opseg izmerenih vrednosti, dok je u slučaju merenja vrednosti UKM, korišćena isključivo vrednost indukovane komponente.

7.2.2. Drugi preliminarni prototip

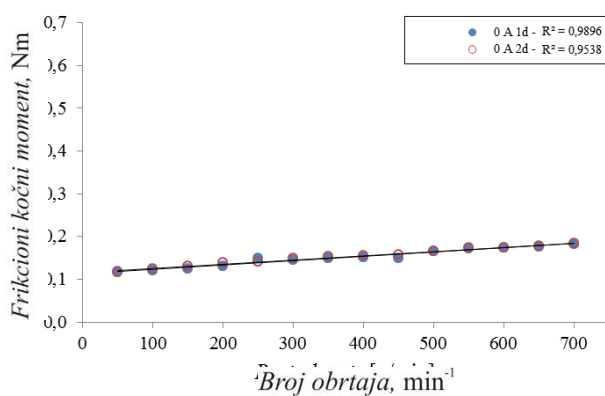
Kao i u slučaju prvog preliminarnog prototipa MR kočnice, i ovde je za svaki broj obrtaja vratila i svaku vrednost upravljačke struje urađeno po 5 uzastopnih merenja vrednosti odgovarajuće komponente UKM. U ovom slučaju, urađeno je 14 serija merenja vrednosti komponenti UKM. Za induktivnu komponentu, broj merenja je dodatno povećan, jer je sada postojao i raspon upravljačke struje od 2 A do 10 A, sa korakom promene od 2 A. Ponovo su serije merenja trajale oko 120 s u zavisnosti od merene komponente.

Prvo je izvršeno merenje vrednosti svih komponenti UKM za konfiguraciju sa jednim diskom a potom i za multidisk konfiguraciju. Izvršeno je merenje vrednosti frikciono-viskozne komponente u punom opsegu broja obrtaja. Nakon ovih merenja, pristupilo se merenju vrednosti UKM, odnosno vrednosti indukovane komponente UKM. Sa inkrementalnim porastom vrednosti upravljačke struje, izmerena je vrednost UKM za svaki broj obrtaja.

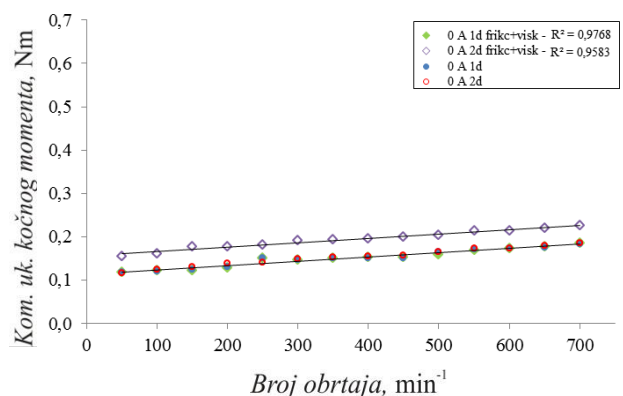
Primenjen je isti postupak obrade izmerenih vrednosti kao i u slučaju prvog preliminarnog prototipa, a dobijeni rezultati predstavljeni su na slikama 7.9 a) – g). Paralelno su na istim dijagramima predstavljene izmerene vrednosti momenata za konfiguraciju sa jednim diskom i multidisk konfiguraciju. Ponovo je primetan monotono rastući karakter dobijenih krivih. Ugao porasta svih krivih je i dalje mali, pa se na osnovu toga, ali i oblika promene frikciono-viskozne komponente može tvrditi da su prikazani rezultati svih komponenti UKM, izuzev frikciono-viskozne, konstantne vrednosti u odnosu na promenu broja obrtaja vratila.

Na osnovu dobijenih rezultata merenja, naknadno su određene srednje vrednosti momenta za svaki broj obrtaja. Ponovo je primenjen postupak linearne regresije. Dobijen je linearan oblik krivih, monotono rastućeg karaktera.

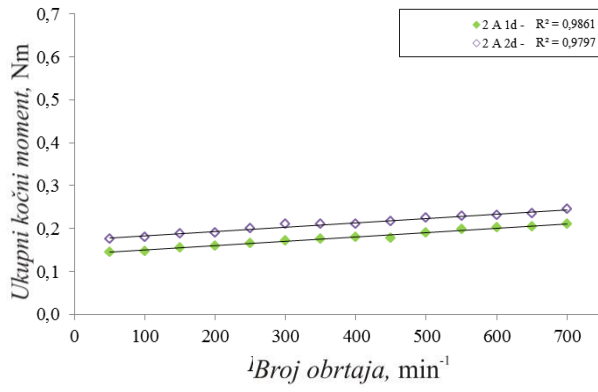
Tokom merenja nije bilo značajnijih problema niti naglih promena mernih vrednosti. Razlog tome bio je povećanje mase ispitnog stola, preciznija izrada i spajanje elemenata konstrukcije, manja veličina procepa ali i bolji postupak odvođenja toplote i raspored merenja. Mogućnost širenja MR tečnosti i izvan komornog prostora tokom merenja sprečio je iznenadne gubitke tečnosti nosioca, pa je, samim tim, sprečen gubitak vrednosti momenta u datom trenutku.



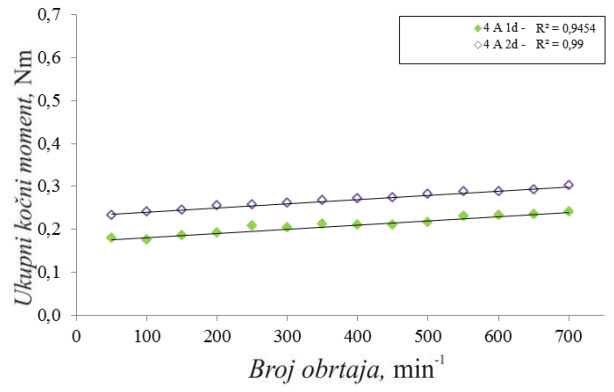
a)



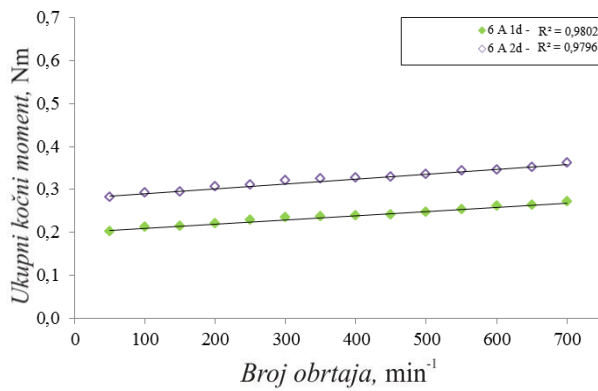
b)



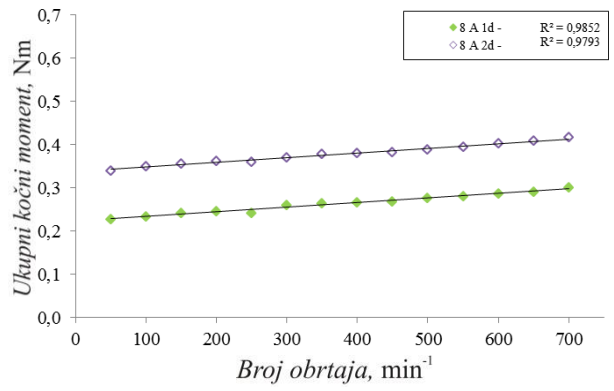
c)



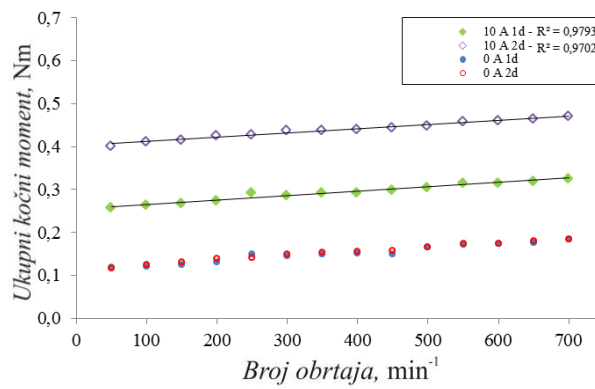
d)



e)



f)



g)

Slika 7.9. Promena vrednosti komponenti UKM drugog preliminarnog prototipa

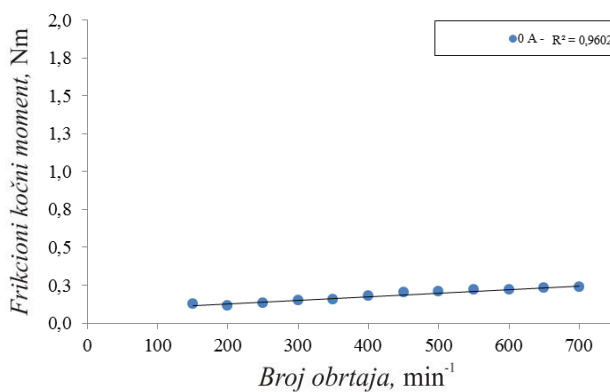
7.2.3. Prototip 1

Na osnovu prethodnih iskustava sa konstrukcijom MR kočnice i sa postupkom i tokom merenja, izvršeno je značajno unapređenje MR kočnice, kako sa konstrukcijskog aspekta, tako i sa aspekta raspodele magnetskog polja. Takođe, u slučaju prvog i drugog preliminarnog prototipa, maksimalno je iskorišćen kapacitet provodnika, odnosno namotaja. Na osnovu tih iskustava, odlučeno je da se naredna merenja vrše manjem strujnom opsegu. Uvođenjem paramagnetskih materijala u konstrukciju došlo je do promene u obliku raspodele magnetskog polja i njegovog povećanja u oblastima od interesa. Kako bi se potvrdila ova hipoteza, izrađena su dva prototipa MR kočnica sa istim glavnim geometrijskim parametrima. Na osnovu obavljenih merenja, potvrđeno je postojanje značajnog povećanja vrednosti UKM, a da je pri tom vrednost frikcione i frikciono-viskozne komponente zadržana na istom ili sličnom nivou.

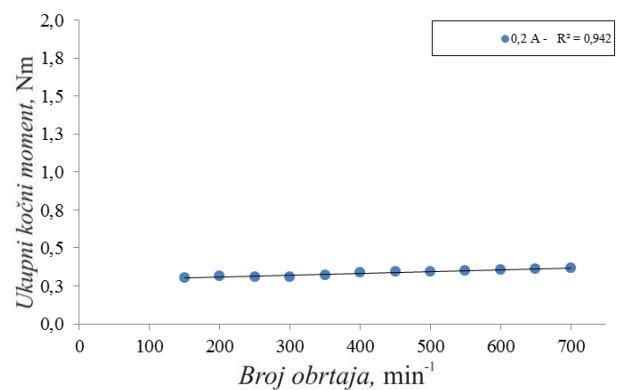
Poštujući prethodno utvrđene i razrađene merne postupke i procedure, pristupilo se utvrđivanju vrednosti komponenti UKM. Prvo su izmerene vrednosti komponenti UKM prototipa 1 u punom opsegu brojeva obrtaja i vrednosti upravljačkih struja, a zatim se prešlo na merenje tih vrednosti za slučaj prototipa 2.

U nastavku teksta, grafički su predstavljene izmerene vrednosti komponenti UKM prototipa 1, na slikama 7.10 a) – f). Vrednost frikcione komponente bliska je vrednostima ostvarenim u prethodna dva slučaja. Opet postoji monotono rastuća tendencija rezultata ove komponente, što se odražava i na rezultate frikciono-viskozne komponente. U slučaju prototipa 1, uticaj vrednosti dodatog viskoznog kočnog momenta na vrednost frikcione komponente bio je neznan, pa je odlučeno da se ovoga puta ta vrednost ni ne prikazuje.

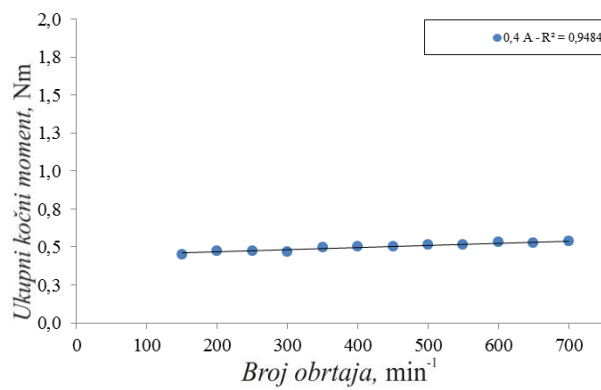
Zbog prisustva paramagnetskih elemenata konstrukcije, jačina magnetskog polja u oblasti diska značajno je povećan, što se odrazilo i na vrednosti indukovane komponente UKM u poređenju sa prethodnim prototipovima. Sa aspekta sličnosti modela MR kočnica, korišćenih materijala i sličnih vrednosti dimenzija MR kočnice, moguće je posmatrati stepen povećanja vrednosti UKM, odnosno stepen povećanja vrednosti indukovane komponente UKM. Povećanje se najlakše može posmatrati poredeći grafikone sa slika 7.9 g) i 7.10. f). Razlika od, praktično, 350% daje jasnu sliku o potencijalu postupka usmeravanja magnetskog polja i kombinovanju radnih režima MR tečnosti. Radi sigurne potvrde dobijenih rezultata, izrađen je još jedan prototip, prototip 2 sa identičnim glavnim geometrijskim parametrima kočnice i namotaja.



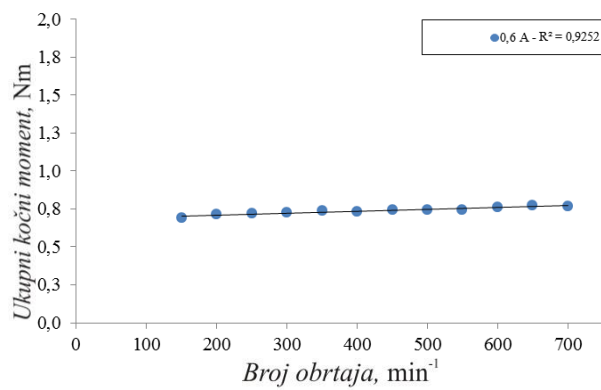
a)



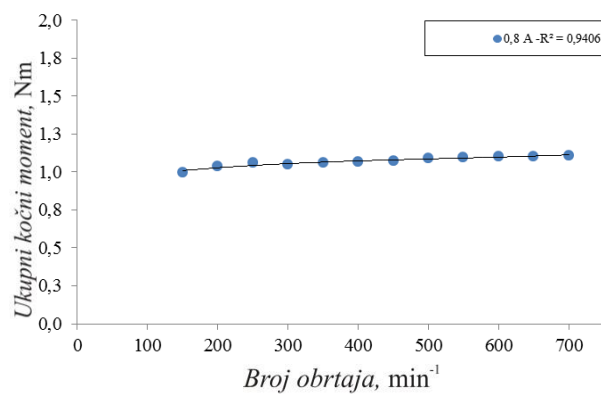
b)



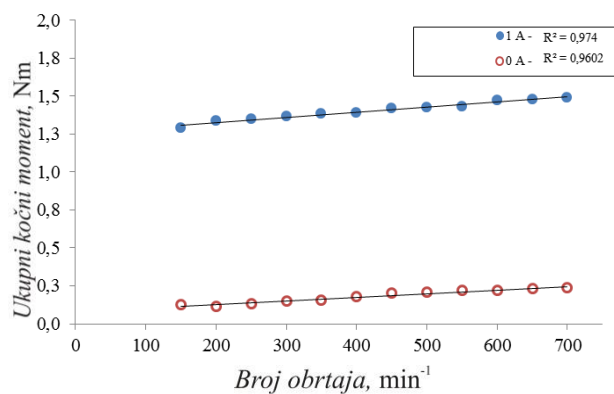
c)



d)



e)

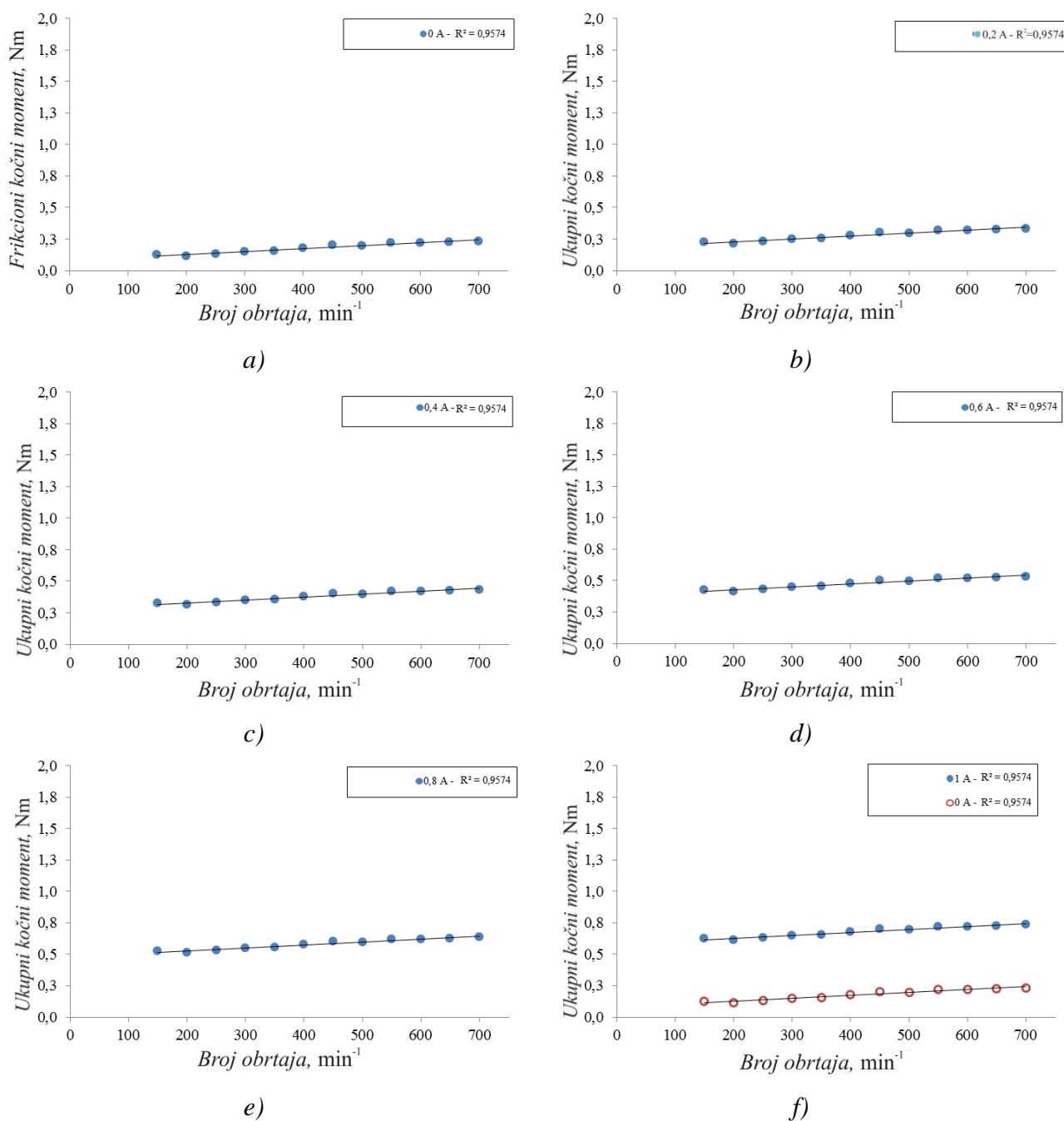


f)

Slika 7.10. Promena vrednosti komponenti UKM prototipa 1

7.2.4. Prototip 2

Koristeći zajedničke elemente koje ima sa prototipom 1 (uležištenja i zaptivanja, namotaj i istu količinu iste vrste MR tečnosti) izvršeno je merenje vrednosti komponenti UKM za slučaj prototipa 2. Poštovana je ista merna procedura, a rezultati su obrađeni na identičan način i predstavljeni na slikama 7.11 a) – f). Ponovo su ostvarene vrlo slične vrednosti frikcione i frikciono-viskozne komponente kao i u slučaju prototipa 1. Linearost promene je i u ovom slučaju jasno vidljiva. Vrednost induktivne komponente UKM u poređenju sa vrednošću te komponente kod prototipa 1 je približno 235% manja. Tokom obrade rezultata ponovo su korišćene metode određivanja aritmetičke sredine i linearne regresije. Koeficijent determinacije linearne regresije, R^2 , je prikazan na svakom grafikonu.



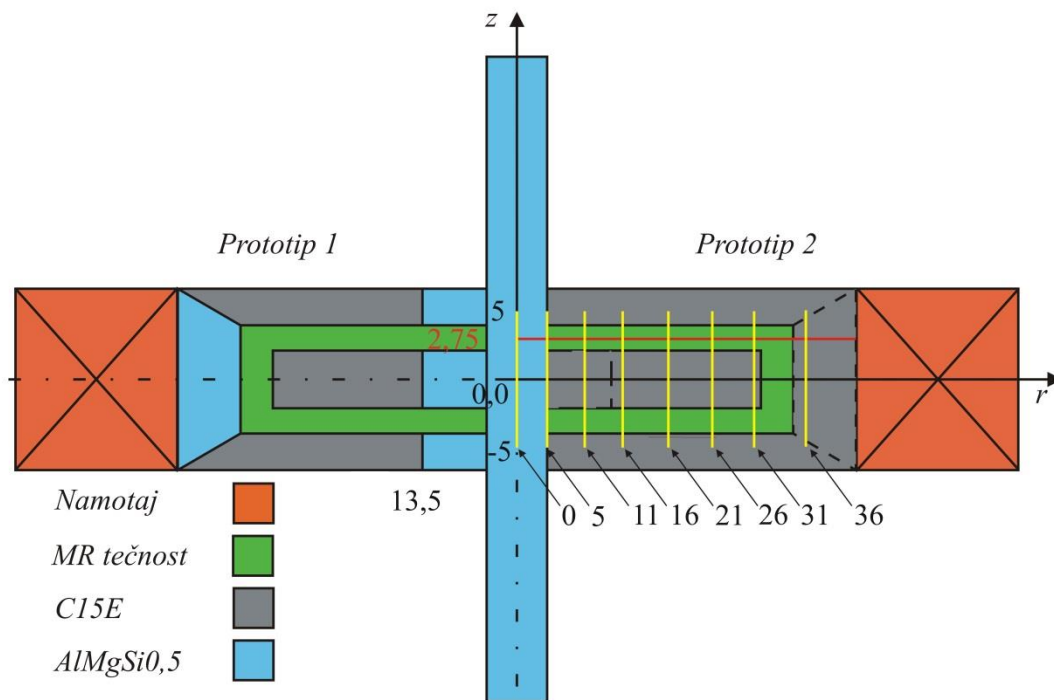
Slika 7.11. Promena vrednosti komponenti UKM prototipa 2

7.3. Modelovanje prototipova 1 i 2 metodom konačnih elemenata

U svrhe numeričkog modelovanja raspodele magnetskog polja i magnetske indukcije kroz tela prototipova 1 i 2, korišćen je programski paket *Comsol Multiphysics*, čiji rad je baziran na metodi konačnih elemenata. Posebano je razmatrana raspodela u oblastima koje sadrže MR tečnost. Detaljno predstavljanje *Comsol* modela prototipova 1 i 2, dato je u [147] i u Podoglavlju 10.3.

U nastavku teksta predstavljeni su rezultati izvršenih simulacija, promene magnetskog polja i magnetske indukcije, koristeći AC/DC modul programskog paketa *Comsol Multiphysics*. Za svaku pojedinačnu simulaciju posebno je definisana vrednost jednosmerne upravljačke struje namotaja. Intenziteti jednosmerne upravljačke struje namotaja kretali su se u rasponu od 0,2 A do 1 A. Zbog geometrije modela, promene magnetskih veličina posmatrane su duž nekoliko karakterističnih linija, slika 7.12, gde su ose MR kočnice obeležene kao osa vratila – z i radijalna osa – r .

Prva posmatrana linija, modela MR kočnice, prostirala se radijalno od ose vratila – z do spoljašnjeg oboda statora u ukupnoj dužini od 37 mm. Linija je postavljena tako da prolazi kroz sredinu sloja MR tečnosti u nivou: $z=2,75$ mm. Pored posmatrane radijalne linije, na modelu je definisano još osam aksijalnih linija, paralelnih sa osom vratila,. Linije su raspoređene tako da r osu seku u nekoliko tačaka, počevši od $r=0$ pa do $r=36$ mm. Pojedinačna dužina ovih linija je 10 mm, i sve se prostiru od $z=-5$ pa do $z=5$, slika 7.12.

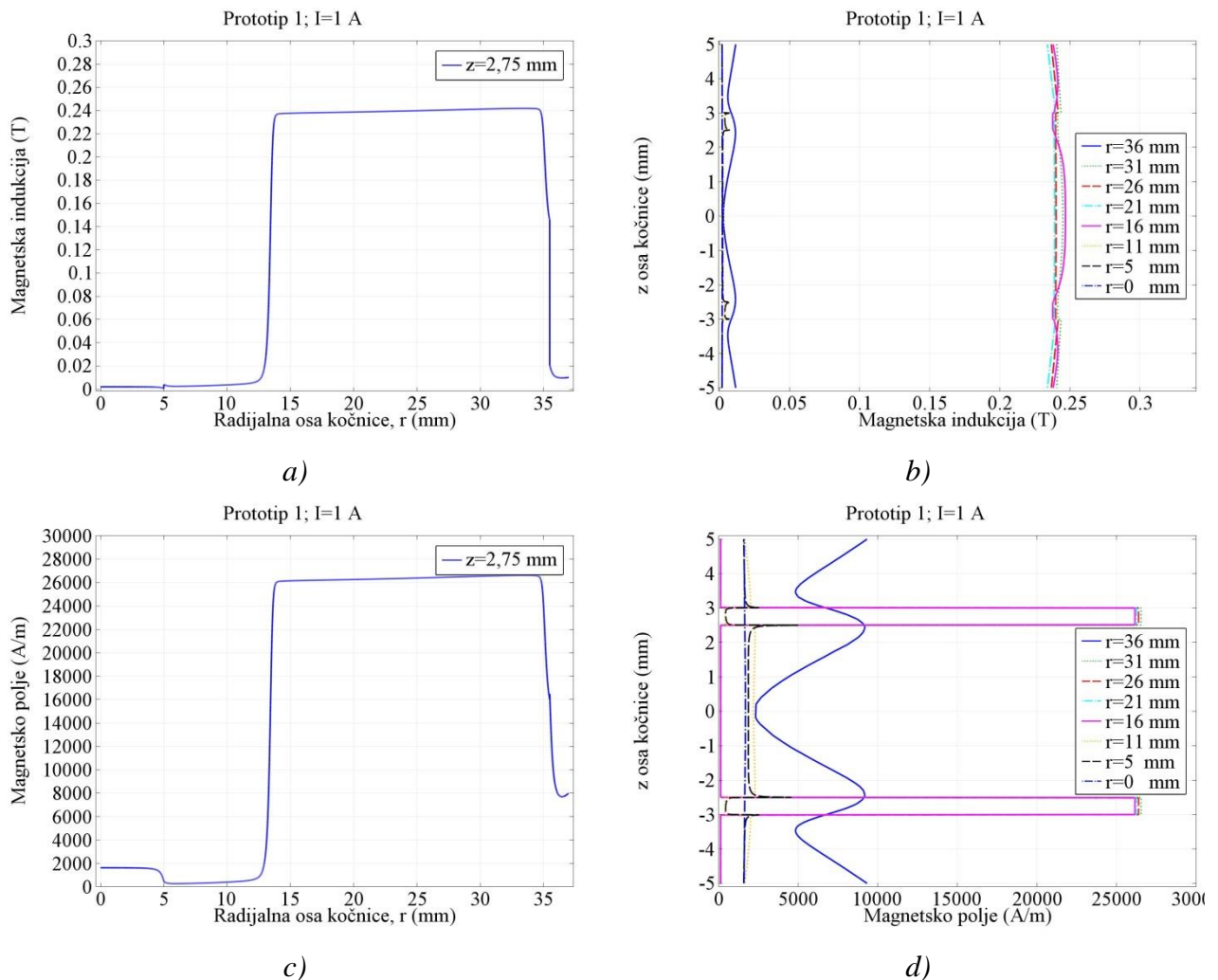


Slika 7.12. Kombinovana ilustracija preseka prototipova 1 i 2 sa prikazom karakterističnih linija

Promena magnetskih parametara, u segmentu tela MR kočnice koji sadrži MR tečnost, od najvećeg je interesa za ovo istraživanje. Ovaj segment, za oba prototipa, počinje u okolini vratila kočnice. Ipak zbog prisustva paramagnetskog materijala u konstrukciji prototipa 1, posmatrao se isključivo deo MR segmenta koji počinje od kote $r=13,5$ mm, leva polovina slike 7.12, tj. prelaz sa aluminijumskih središta na čelični deo konstrukcije MR kočnice. U slučaju prototipa 2, desna polovina slike 7.12, MR segment počinje kod vratila, $r=5$ mm. Kod oba prototipa, MR segment se završava u dodirnoj tački temenog dela MR tečnosti i unutrašnjeg oboda statora – $r=35,5$ mm.

U slučaju simulacija sa prototipom 1, očekivana je značajna promena magnetskih parametara u rasponu od kote 13,5 mm pa do kote 35,5 mm, tj. od početka MR segmenta pa do prelaza na aluminijumsku čauru. Razlog tome je prisustvo paramagnetskog materijala u telu MR kočnice odnosno drugačija raspodela magnetskih veličina u odnosu na prototip 2. U slučaju prototipa 2 značajne promene magnetskih veličina očekivane su na spoju vratilo – disk i u oblasti čelične čaure. Razlog tome je razlika u vrednostima magnetskih permeabilnosti materijala i postojanju magnetskih mostova.

Rezultati promena magnetskih veličina, po svim linijama, predstavljeni su grafičkim putem. Karakteristični primeri rezultata dati su na slikama 7.13 a), b), c) i d). Na ovim slikama predstavljene su promene magnetske indukcije i magnetskog polja u odnosu na promenu koordinata duž r i duž z ose, za intenzitet upravljačke struje namotaja od 1 A.



Slika 7.13. Rezultati simulacije promene vrednosti magnetske indukcije i magnetskog polja, u oblasti predloženih linija

- a) promena magnetske indukcije po r osi, b) promena magnetske indukcije po z osi,
c) promena magnetskog polja po r osi, d) promena magnetskog polja po z osi

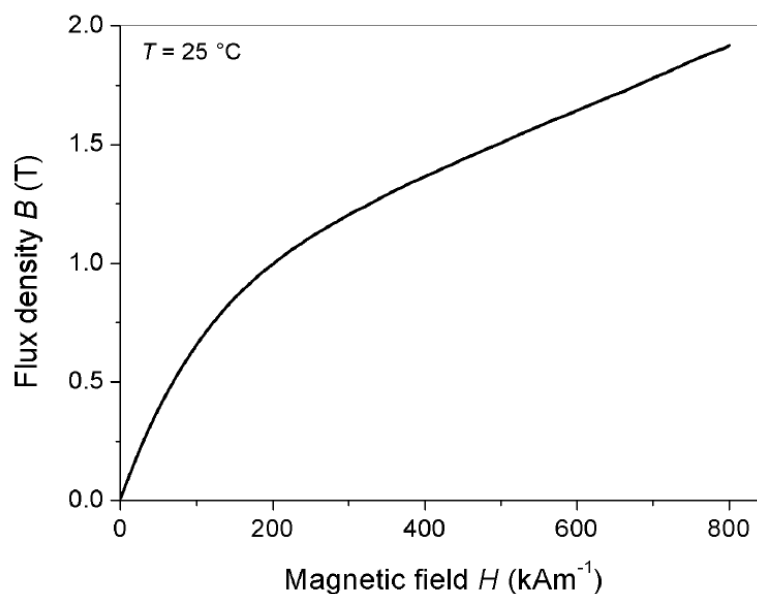
Ukupni rezultati simulacija promena magnetskog polja, za oba prototipa po obe ose, predstavljeni su na slikama 7.15 a) - j) i 7.16 a) - j), dok su rezultati simulacija promena magnetske indukcije, za oba prototipa po obe ose, dati na slikama 7.17 a) - j) i 7.18 a) - j).

Na slikama, predstavljenim u nastavku ovog dela teksta, date su promene magnetskih veličina u telima prototipova 1 i 2 za sve intenzitete upravljačkih struja namotaja. Radi boljeg predstavljanja i poređenja rezultata postavljeni su isti fiksni opsezi za obe magnetske veličine i za prototip 1 i za prototip 2. Za potebe modelovanja MR tečnosti Basonetic 5030 u *Comsol*-u, korišćene su numeričke vrednosti dobijene sa $H - B$ krive, prikazane 7.14.

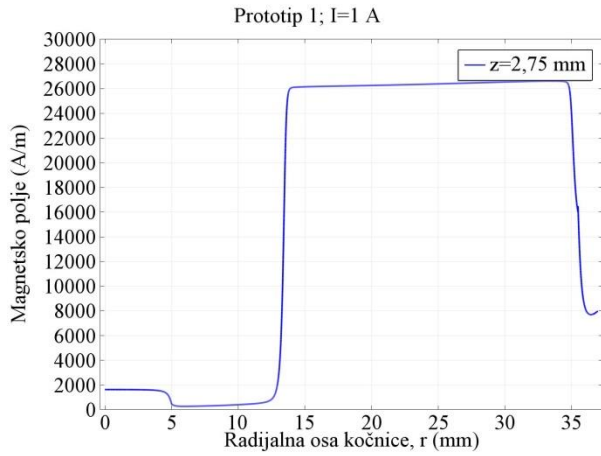
Usrednjene numeričke vrednosti magnetskog polja i magnetske indukcije po r osi za sve vrednosti upravljačke struje date su u tabeli 7.2. Ove vrednosti se odnose isključivo na segment sa MR tečnošću, za model prototipa 1 u rasponu od kote $r=13,5$ mm do kote $r=35,5$ mm a za model prototipa 2 od kote $r=5$ mm do kote $r=35,5$ mm.

Tabela 7.2. Numeričke vrednosti magnetskih veličina modela prototipova 1 i 2 po r osi

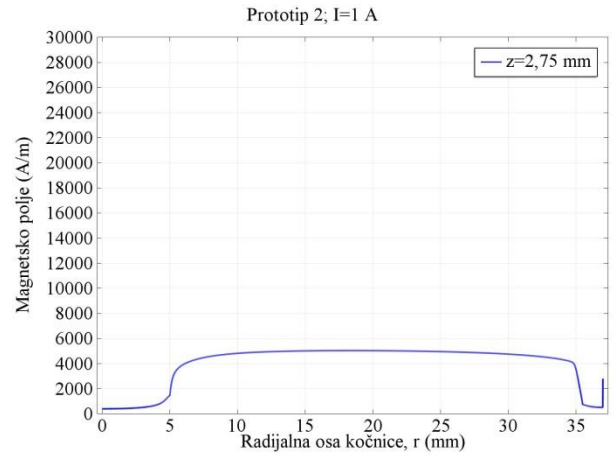
	Upravljačka struja namotaja, A					Magnetska veličina
	1	0,8	0,6	0,4	0,2	
Prototip 1	26100	21300	15950	10600	5100	H , A/m
	0,24	0,19	0,144	0,096	0,048	B , T
Prototip 2	4900	3850	2250	1850	900	H , A/m
	0,065	0,051	0,040	0,025	0,015	B , T



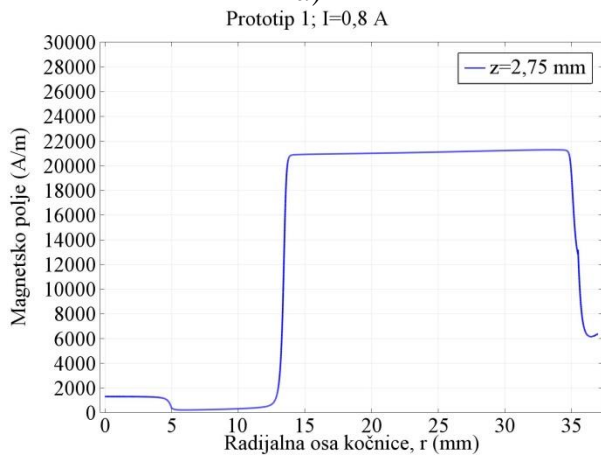
Slika 7.14. Kriva prvobitnog magnetisanja Basonetic 5030, [90]



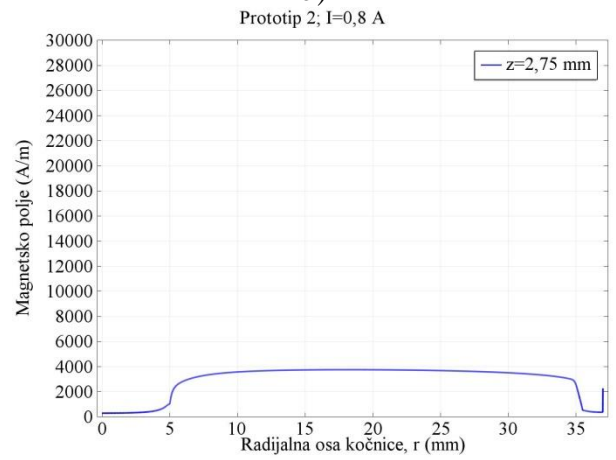
a)



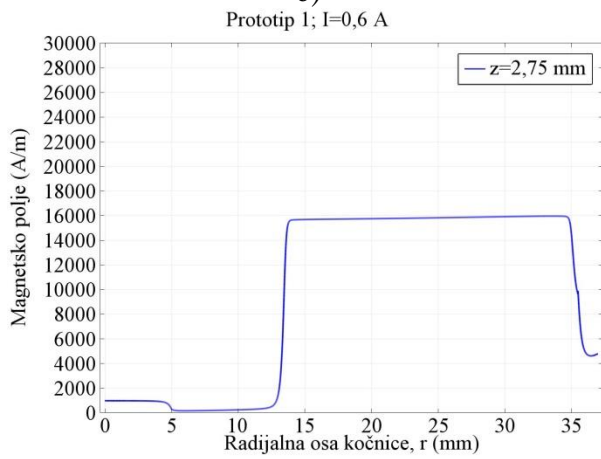
b)



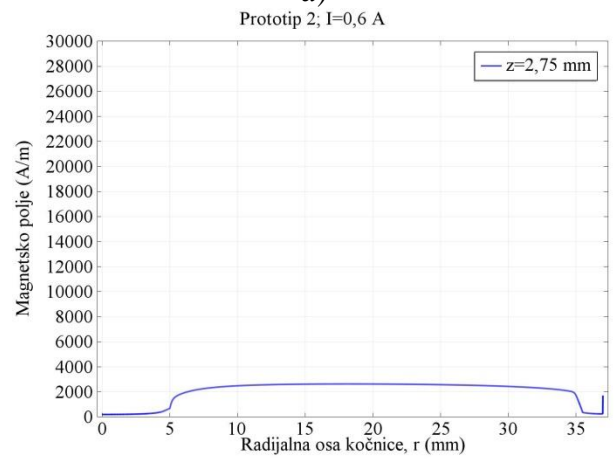
c)



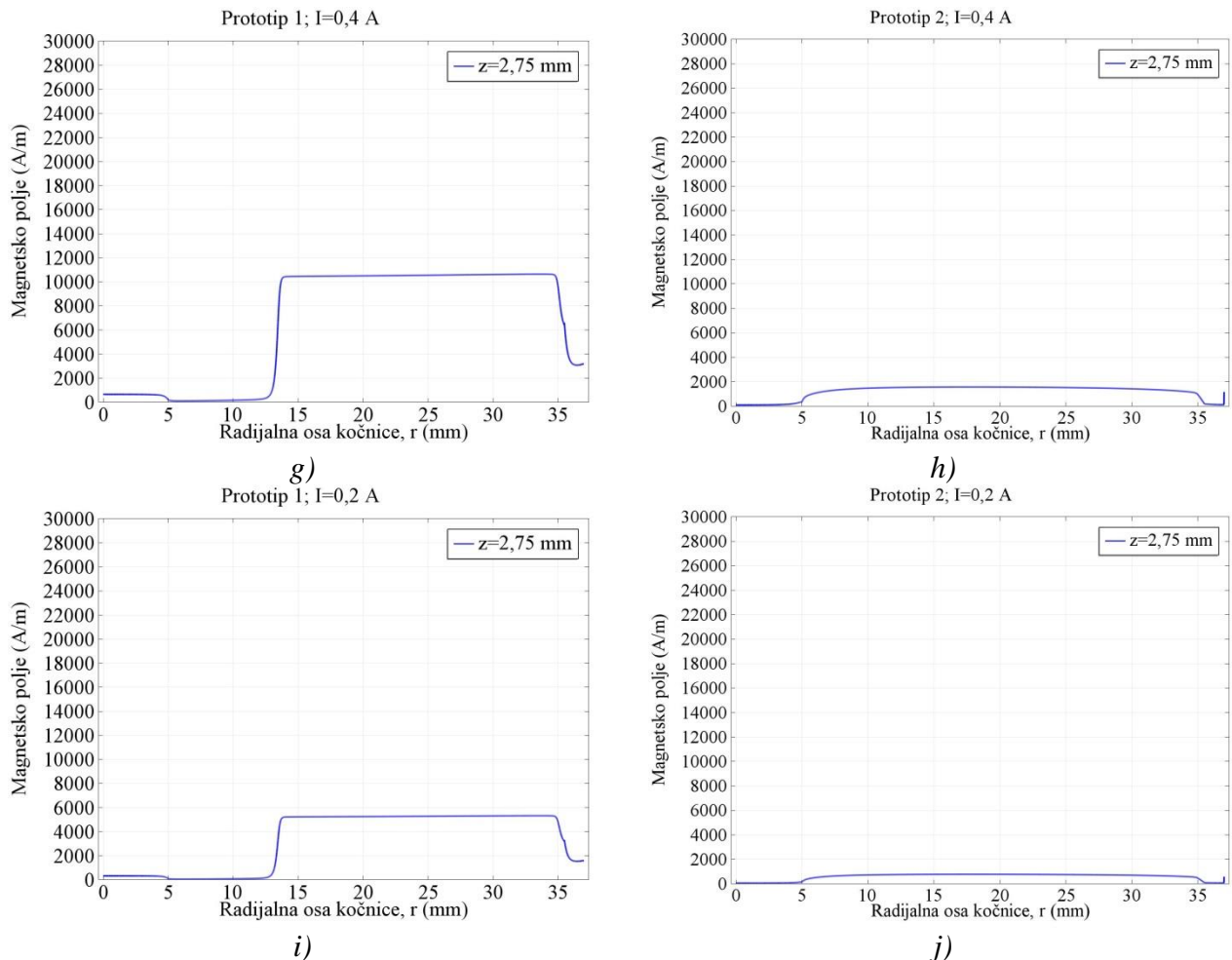
d)



e)



f)

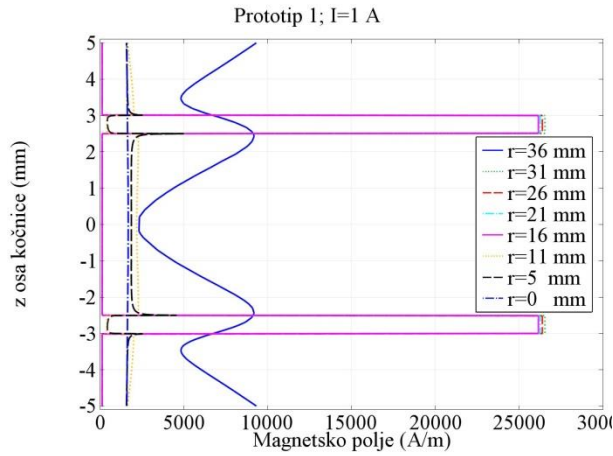


Slika 7.15. Promene magnetskog polja prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu r , za sve vrednosti upravljačke struje namotaja

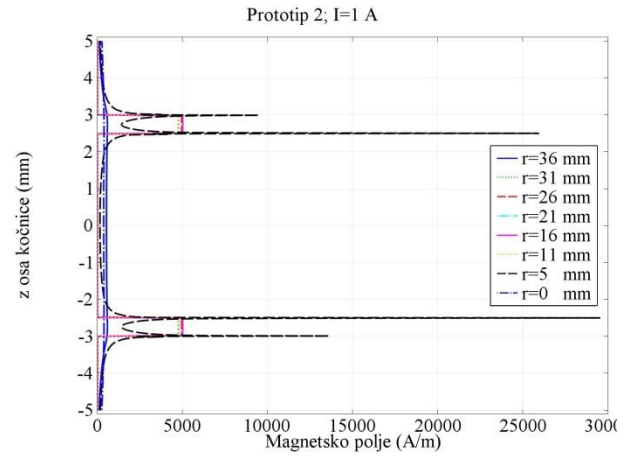
Posmatrajući promenu vrednosti magnetskog polja, za model prototipa 1 duž ose r slike 7.15 a), c), e), g) i i), u okolini kote $r=5$ mm javlja se manja promena vrednosti magnetskog polja. Kota $r=5$ mm predstavlja prelaz sa paramagnetskog vratila na MR tečnost. Posmatrajući dalje promenu magnetskog polja prototipa 1 duž ose r , u okolini kote $r=13,5$ mm primetan je nagli porast vrednosti magnetskog polja. Kota $r=13,5$ mm predstavlja početak dela segmenta MR tečnosti koji je sada okružen feromagnetskim materijalom. Vrednost magnetskog polja, od kote $r=13,5$ mm pa do kote $r=35$ mm, je konstantna za sve vrednosti upravljačke struje. Nagli pad vrednosti magnetskog polja vidljiv je posle kote $r=35$ mm, što predstavlja prelaz sa segmenta MR tečnosti, u okolini temenog dela diska, na paramagnetski materijal čaure.

U slučaju modela prototipa 2, slike 7.15 b), d), f), h) i j), promene vrednosti magnetskog polja dešavale su se u okolinama istih karakterističnih kota kao što je to bio slučaj i kod modela prototipa 1. U okolini kote $r=5$ mm, prelaz sa feromagnetskog materijala vratila na MR tečnost, postoji nagli skok vrednost magnetskog polja. U opsegu od kote $r=5$ mm do kote $r=35$ mm, vrednost magnetskog polja je konstantna. Nakon kote $r=35$ mm, slično kao i kod prototipa 1, primetan je nagli pad vrednosti magnetskog polja. Oblast od kote $r=35$ mm do kote $r=37$ mm predstavlja prelaz sa segmenta MR tečnosti, u okolini temenog dela diska, na feromagnetski materijal čaure.

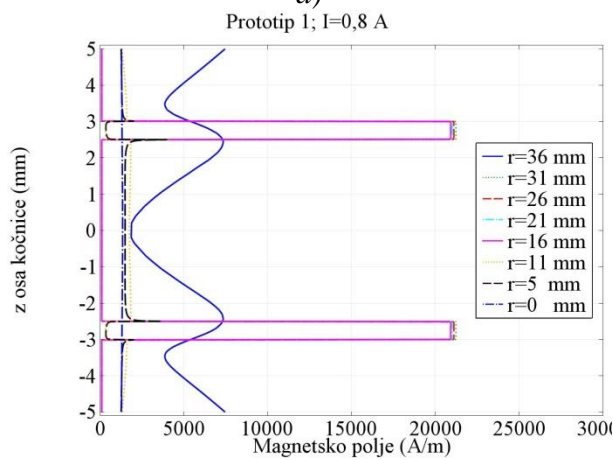
Rezultati simulacija promena vrednosti magnetskog polja, za oba prototipa i za sve vrednosti upravljačkih struja, po 8 aksijalnih linija predstavljeni su na slikama 7.16 a) - j).



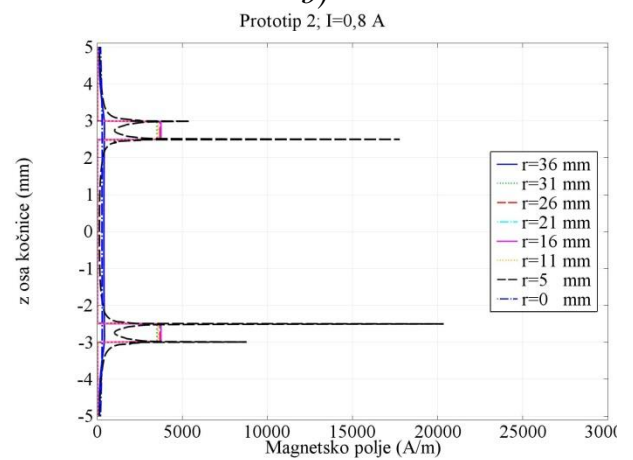
a)



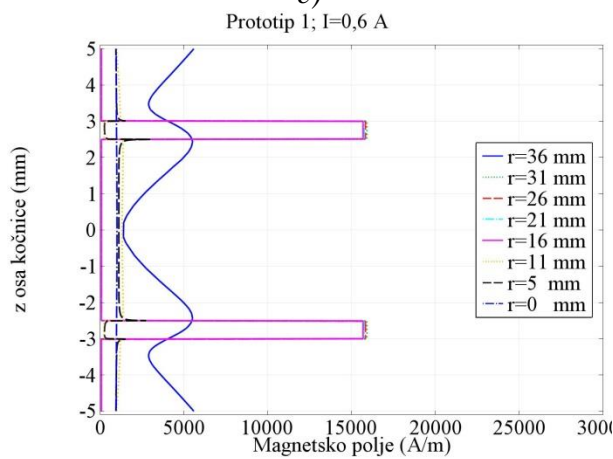
b)



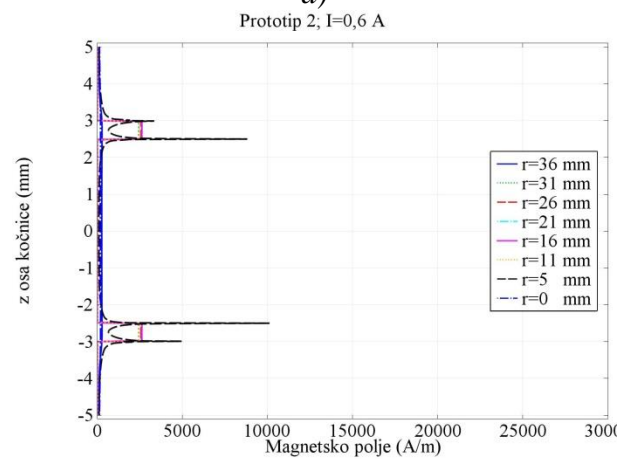
c)



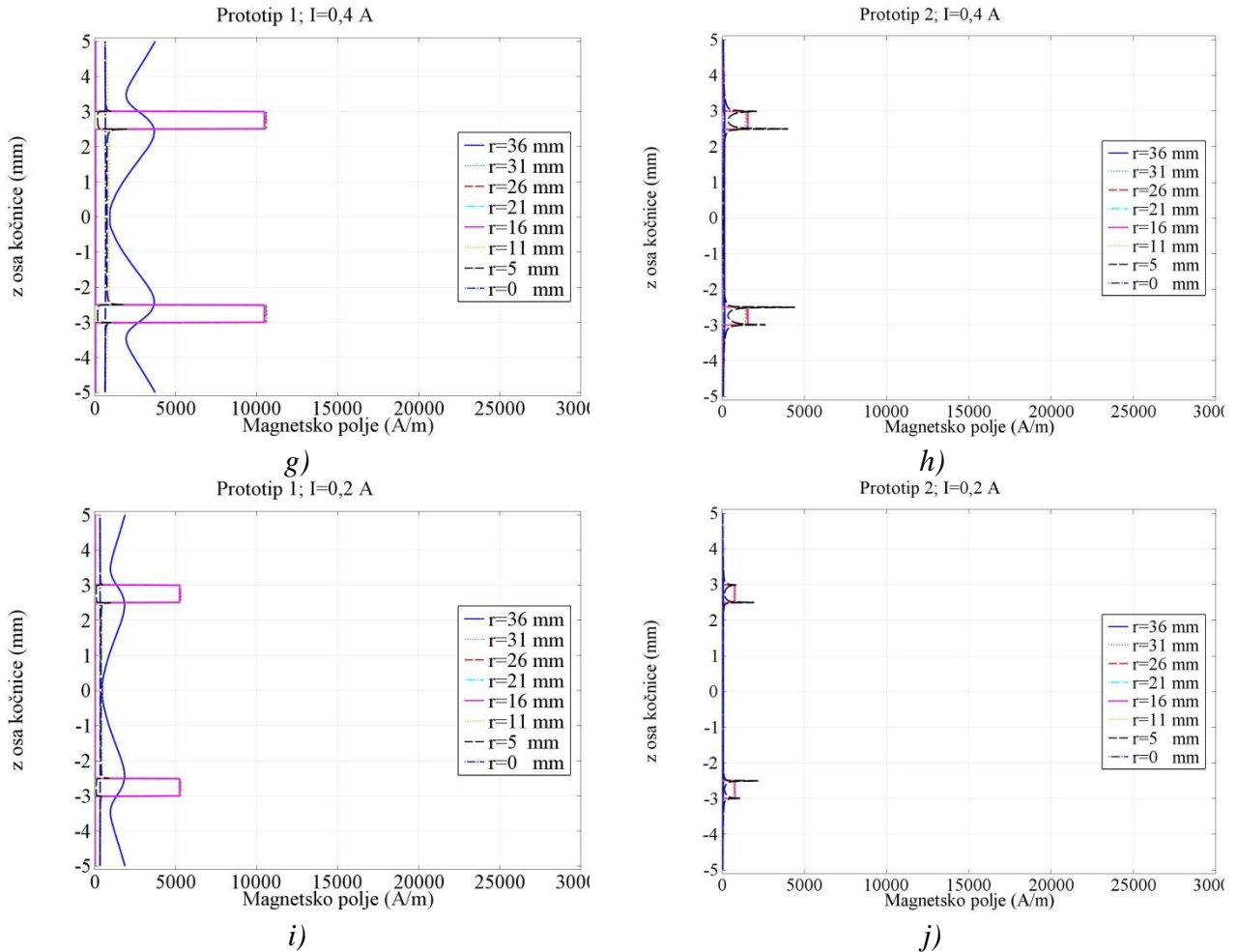
d)



e)



f)

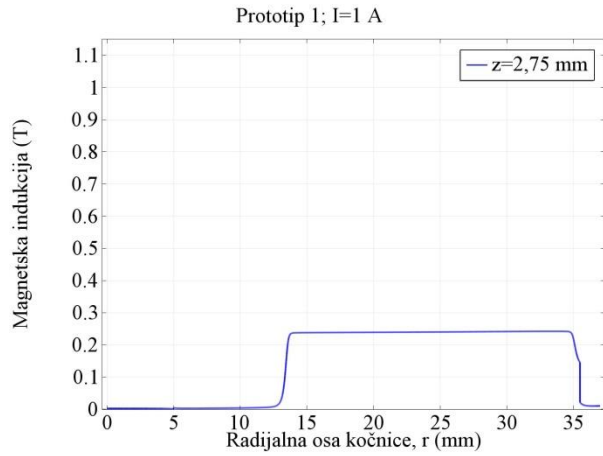


Slika 7.16. Promene magnetskog polja prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu z , za sve vrednosti upravljačke struje namotaja

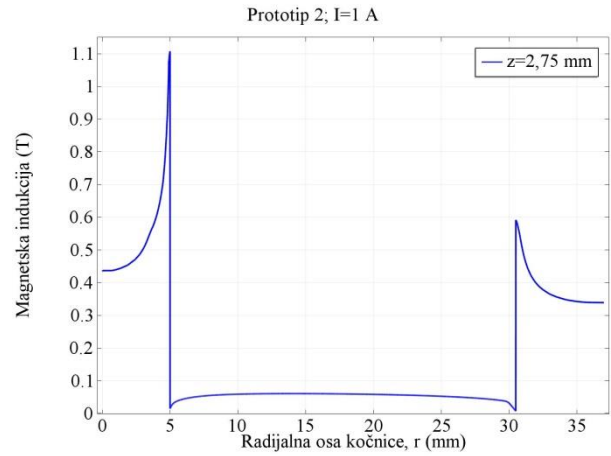
U slučaju modela prototipa 1, raspored aksijalnih linija je takav da linija, na slikama 7.16 obeležena sa $r=0$ mm, prolazi isključivo kroz vratilo od paramagnetskog materijala. Zatim, 2 linije, na slikama 7.16 obeležene sa $r=5$ mm i $r=11$ mm, prolaze kroz paramagnetski materijal središta statorskih polovina i diska i MR tečnost. Naredne četiri aksijalne linije, na slikama 7.16 obeležene sa $r=16$ mm, $r=21$ mm, $r=26$ mm i $r=31$ mm, prolaze kroz feromagnetski materijala statorskih polovina i diska i MR tečnost. Poslednja aksijalna linija, na slikama 7.16 obeležena sa $r=36$ mm, prolazi isključivo kroz paramagnetski materijal čaure.

U slučaju modela prototipa 2, raspored aksijalnih linija po r osi je identičan sa rasporedom predstavljanim kod modela prototipa 1. Aksijalne linije $r=0$ mm i $r=36$ mm prolaze isključivo kroz feromagnetski materijal vratila i čaure, respektivno. Preostale linije prolaze kroz kombinaciju feromagnetskog materijala i MR tečnosti.

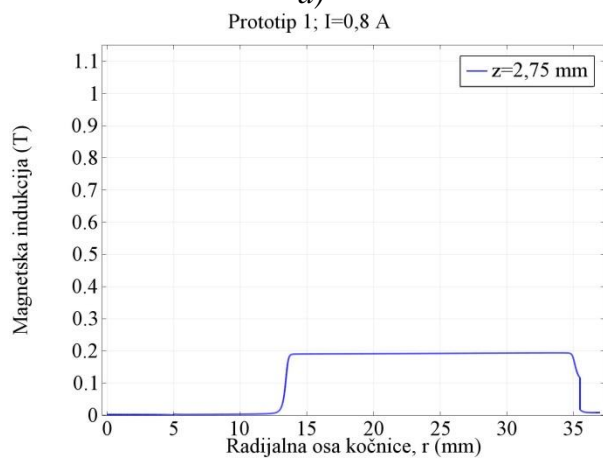
Za ovo istraživanje od najvećeg značaja su vrednost magnetskog polja u oblasti procepa sa MR tečnošću. Iz rezultata simulacija, predstavljenih na slikama 7.16, a za oba prototipa, vidi se da značajnija promena vrednosti magnetskog polja postoji isključivo u oblasti procepa sa MR tečnošću. Kod modela prototipa 1 ova promena je izraženija i nekoliko puta veća nego što je to slučaj kod modela prototipa 2. Posmatrajući aksijalnu liniju, $r=5$ mm u oblasti procepa sa MR tečnošću ($-3 \text{ mm} < z < -2,5 \text{ mm}$ i $2,5 \text{ mm} < z < 3 \text{ mm}$) za oba prototipa, primetno je postojanje naglih skokova vrednosti magnetskog polja.



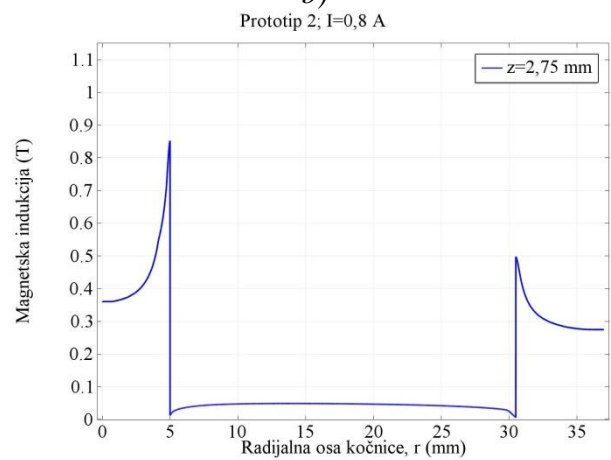
a)



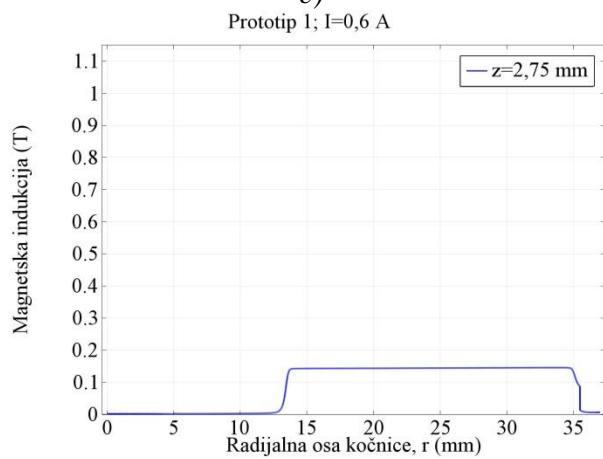
b)



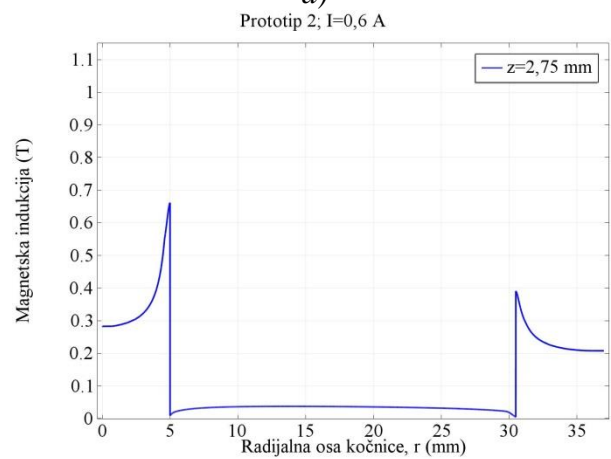
c)



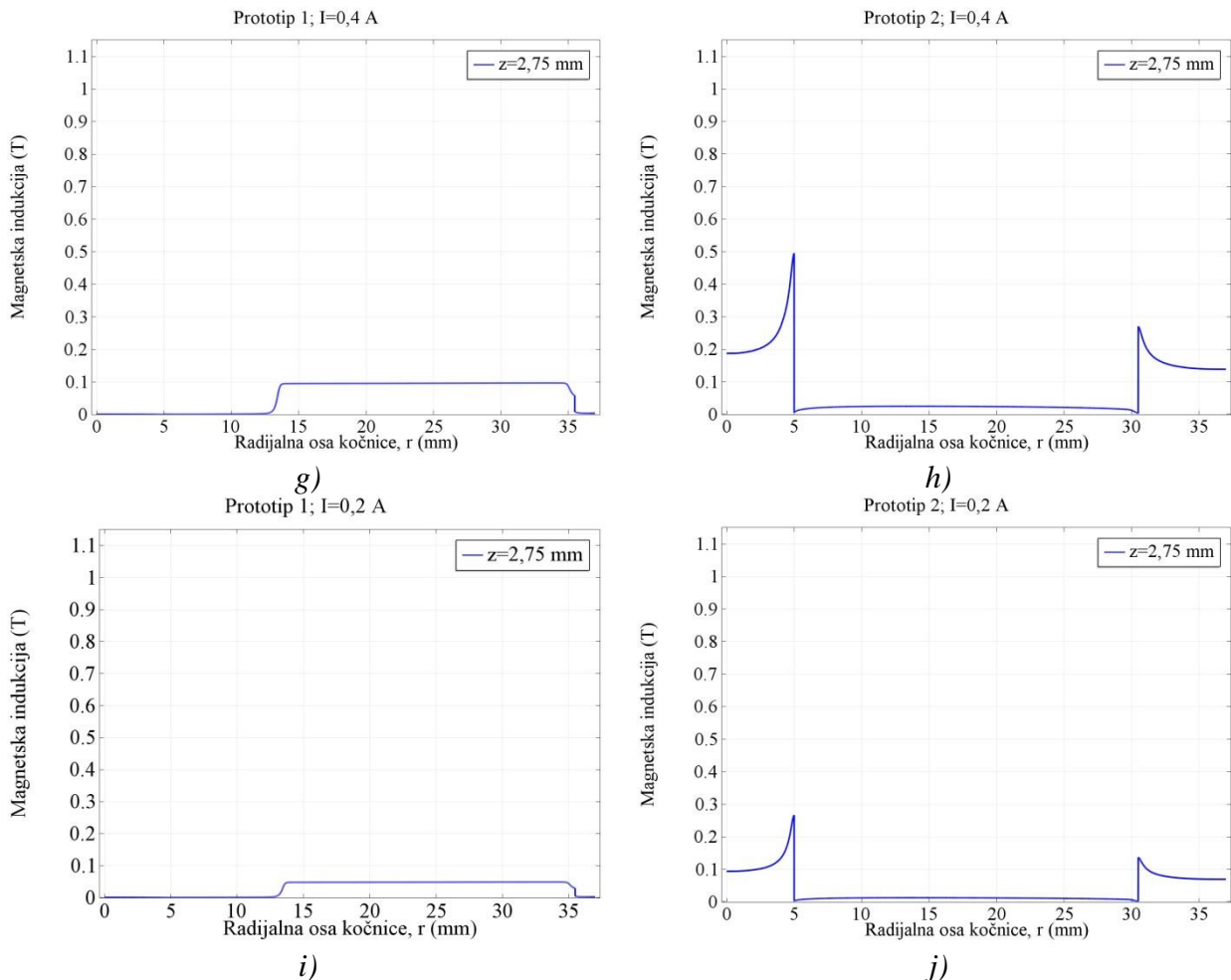
d)



e)



f)

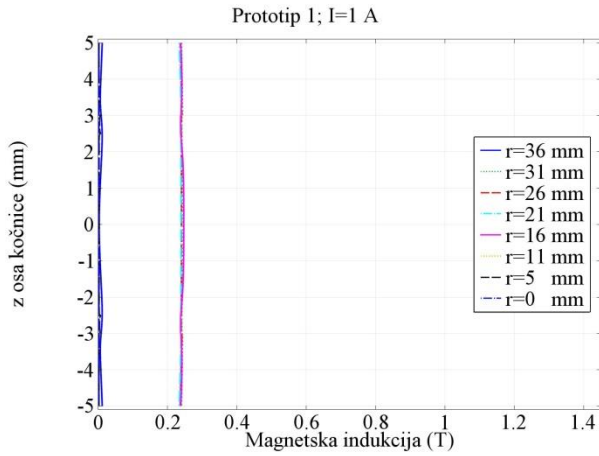


Slika 7.17. Promene magnetske indukcije prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu r , za sve vrednosti upravljačke struje namotaja

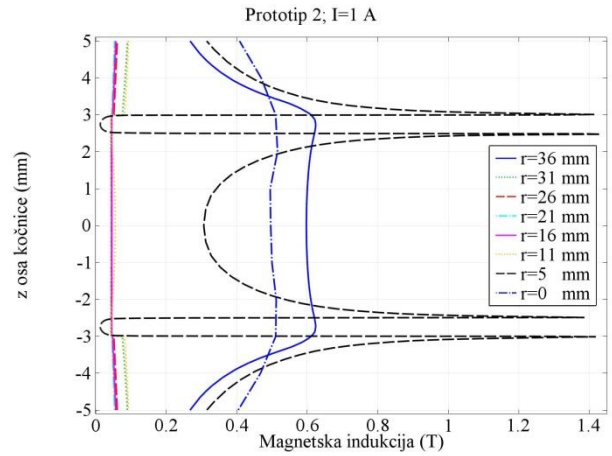
Posmatrajući promenu vrednosti magnetske indukcije, za model prototipa 1 duž ose r slike 7.17 a), c), e), g) i i), u okolini kote $r=13,5$ mm primetan je nagli porast vrednosti magnetske indukcije. Kota $r=13,5$ mm predstavlja početak dela segmenta MR tečnosti koji je sada okružen feromagnetskim materijalom. Vrednost magnetske indukcije, od kote $r=13,5$ mm pa sve do kote $r=35$ mm, je konstantna za sve vrednosti upravljačke struje. Nagli pad vrednosti magnetske indukcije vidljiv je posle kote $r=35$ mm, što predstavlja prelaz sa segmenta MR tečnosti, u okolini temenog dela diska, na paramagnetski materijal čaure.

U slučaju modela prototipa 2, slike 7.17 b), d), f), h) i j), promene vrednosti magnetske indukcije dešavale su se u okolinama karakterističnih kota kao što je to bio slučaj i kod modela prototipa 1. U okolini kote $r=5$ mm, prelaz sa feromagnetskog materijala vratila na MR tečnost, postoji nagli pad vrednost magnetske indukcije. U opsegu od kote $r=5$ mm do kote $r=35$ mm, vrednost magnetske indukcije je niska i konstantna. Nakon kote $r=35$ mm, za razliku od modela prototipa 1, primetan je nagli skok vrednosti magnetske indukcije. Oblast od kote $r=35$ mm do kote $r=37$ mm predstavlja prelaz sa segmenta MR tečnosti, u okolini temenog dela diska, na feromagnetski materijal čaure.

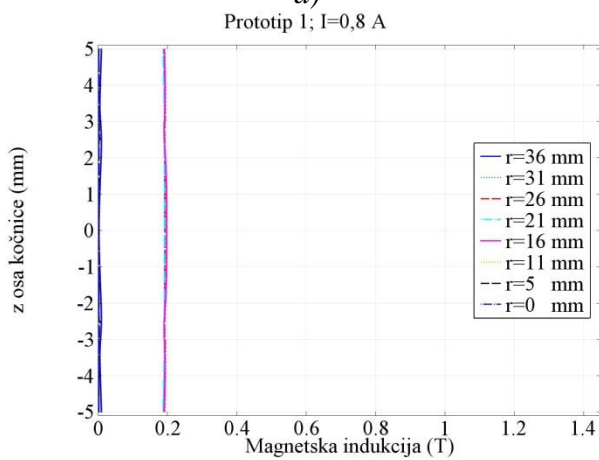
Rezultati simulacija promena vrednosti magnetske indukcije, za oba prototipa i za sve vrednosti upravljačkih struja, po 8 aksijalnih linija predstavljeni su na slikama 7.18 a) - j).



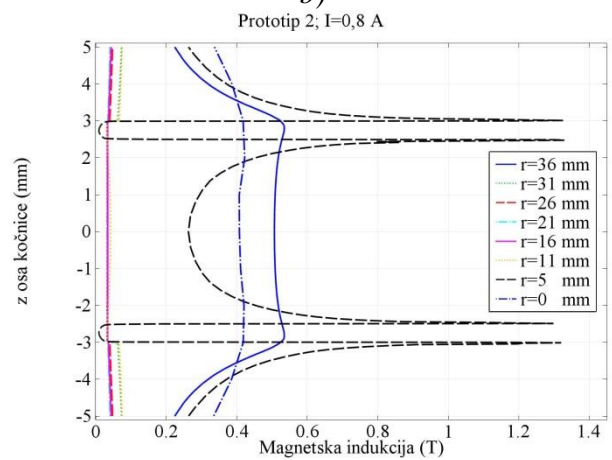
a)



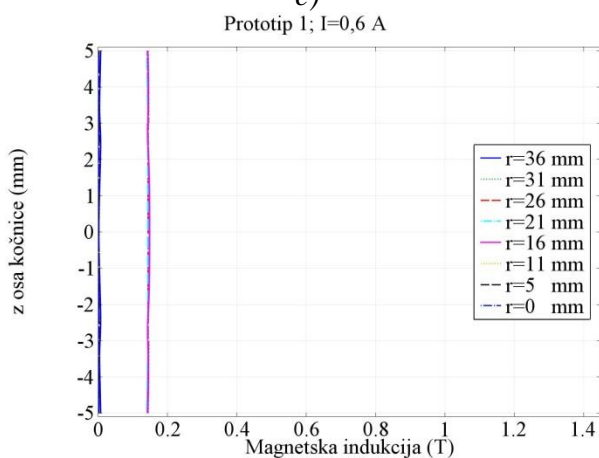
b)



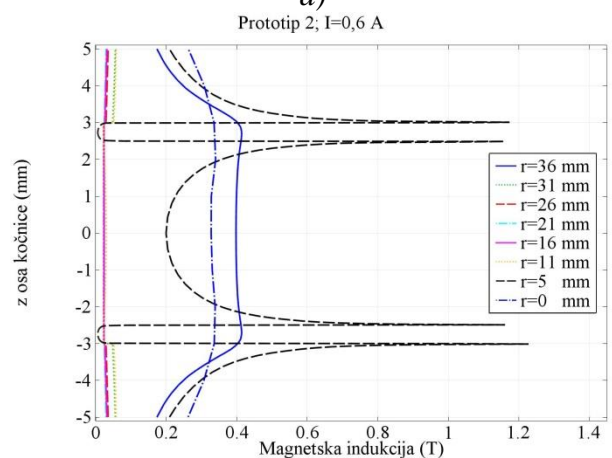
c)



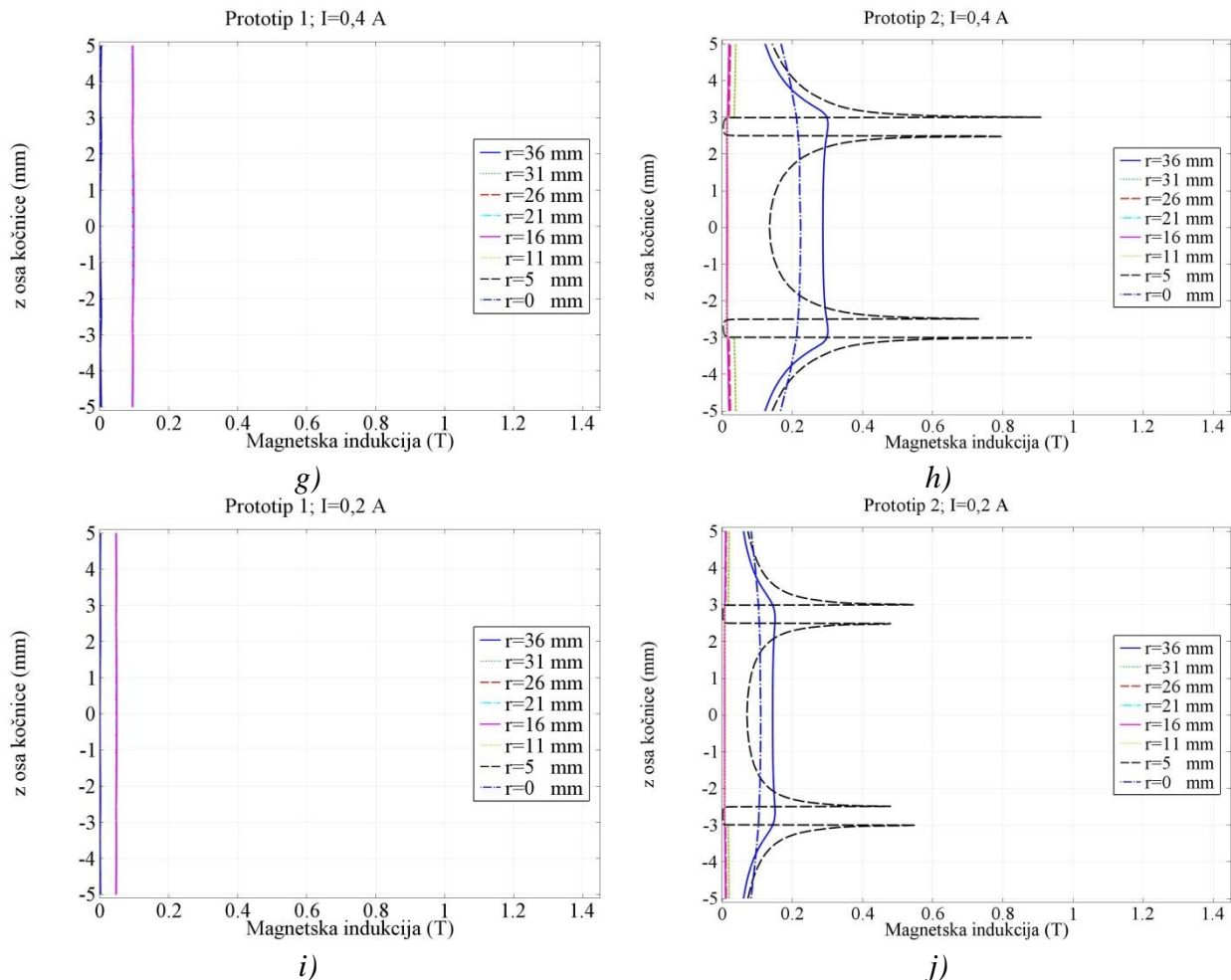
d)



e)



f)



Slika 7.18. Promene magnetske indukcije prototipova 1 i 2 u odnosu na koordinatu z , za sve vrednosti upravljačke struje namotaja

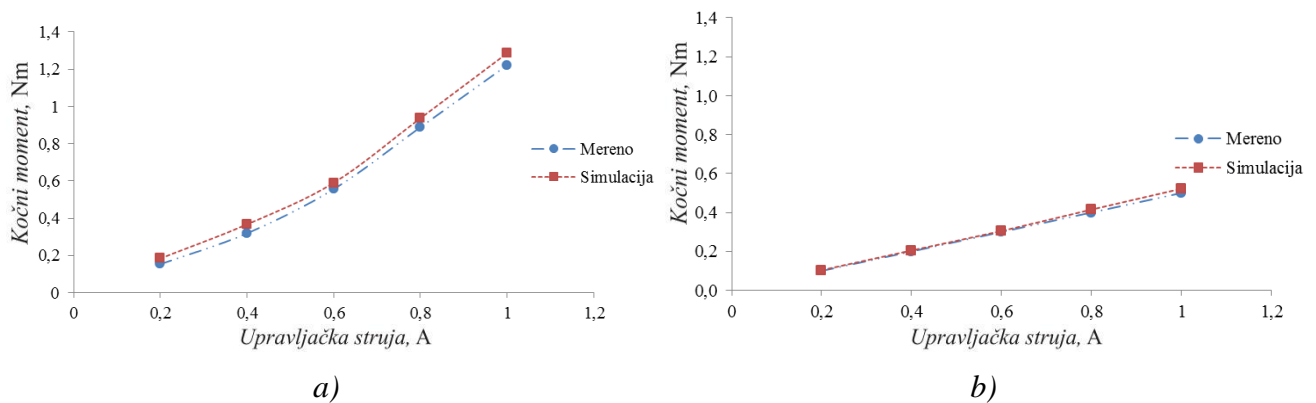
Identična raspodela aksijalnih linija, raspodeli korišćenoj za prezentovanje vrednosti magnetskog polja sa slika 7.16, korišćena je i u slučaju prezentovanja promena vrednosti magnetske indukcije, slike 7.18 a) - j).

Vrednost magnetske indukcije, modela prototipa 1, je niska, posmatrano po linijama $r=0$ mm, $r=5$ mm, $r=11$ mm i $r=36$ mm, kako u telu modela tako i u oblasti procepa sa MR tečnošću. Posmatrano po aksijalnim linijama $r=16$ mm, $r=21$ mm, $r=26$ mm i $r=31$ mm, vrednost magnetske indukcije je konstantna, kako u telu modela tako i u oblasti procepa sa MR tečnošću, sa tendencijom opadanja sa opadanjem vrednosti upravljačke struje.

U slučaju modela prototipa 2, vrednost magnetske indukcije po linijama $r=0$ mm i $r=36$ mm ima značajniji priraštaj u oblasti $-3 \text{ mm} < z < 3 \text{ mm}$. Ovaj priraštaj magnetske indukcije jasan je pokazatelj postojanja magnetskih mostova u oblasti vratila ($r=0$ mm) i feromagnetske čaure ($r=36$ mm) modela prototipa 2. Pored promena po linijama $r=0$ mm i $r=36$ mm, promena vrednosti magnetske indukcije izražena je i po liniji $r=5$ mm. Vrednost magnetske indukcije u oblasti prelaska sa vratila na MR tečnost je niska i jednaka je sa vrednostima magnetske indukcije po linijama $r=16$ mm, $r=21$ mm, $r=26$ mm i $r=31$ mm. Vrednost magnetske indukcije po liniji $r=5$ mm u oblasti tela ($-5 \text{ mm} < z < -3 \text{ mm}$, $-2,5 \text{ mm} < z < 2,5 \text{ mm}$ i $3 \text{ mm} < z < 5 \text{ mm}$) uporediva je sa vrednostima po linijama $r=0$ mm i $r=36$ mm.

Na osnovu: parametara iz tabele 7.2, zatim odnosa B - τ MR tečnosti [90] i jednačine (4.11), određene su i numeričke vrednosti simulacije kočnog momenta za oba modela. U jednačini (4.11) u obzir je uzeta i vrednost unutrašnjeg prečnika diska, mada se ovaj parametar često može zanemariti zbog velikog odnosa vrednosti unutrašnjeg i spoljašnjeg poluprečnika diska. Rezultati dobijeni na ovaj način upoređeni su sa realnim izmerenim vrednostima UKM. Za potrebe poređenja simulacionih i izmerenih vrednosti kočnog momenta, iz sume izmerenih vrednosti komponenti UKM izostavljena je frikciona komponenta.

Radi što kvalitetnijeg i jednostavnijeg poređenja, rezultati merenja i rezultati simulacije, predstavljeni su paralelno na slikama 7.19 a) i b). Rezultati su dati u obliku dijagrama zavisnosti kočnog momenta od upravljačke struje, zbog činjenice da se vrednosti komponenti UKM, izuzev frikcione, praktično ne menjaju sa promenom broja obrtaja.



Slika 7.19. Poređenje rezultata numeričke simulacije sa izmerenim vrednostima kočnog momenta, a) prototip 1, b) prototip 2

Poređenjem dobijenih rezultata, ustanovljeno je da postoji određen stepen odstupanja između rezultata simulacije i rezultata merenja UKM. Radi dobijanja što preciznije predstave o meri odstupanja vrednosti simulacije od merene vrednosti UKM, odnosno veličini greške, dobijeni rezultati su obrađeni metodom relativnog odstupanja. Za svaku vrednost upravljačke struje određena je vrednost relativnog odstupanja i na osnovu tih podataka određena je srednja vrednost relativnog odstupanja rezultata simulacija od rezultata merenja UKM. U slučaju prototipa 1 srednja vrednost relativnog odstupanja je bila približno 8%, dok je ta vrednost u slučaju prototipa 2 bila približno 2,5%. Postojanje ovih odstupanja objašnjava se:

- postojanjem neznatnih razlika u materijalu korišćenom za izradu prototipova i materijala definisanog u programskom paketu *Comsol Multiphysics* i
- postojanjem neznatne razlike u parametrima između modela namotaja i stvarnog namotaja.

8. Zaključna razmatranja i pravci budućih istraživanja

U okviru uvodnih razmatranja, analizirana su osnovna svojstva i zahtevi koje kočnica, kao izvršni element kočnog sistema, mora ispuniti. Trenutno, ove zahteve najpotpunije ispunjava konvencionalna frikciona kočnica. Pored frikcione kočnice, deo zahteva ispunjavaju i druge vrste kočnica a neretko i bolje nego što to frikciona kočnica može. Na osnovu ovoga zaključeno je da postoji opravdan razlog za proučavanje nekonvencionalnih tipova kočnica.

Cilj ovog istraživanja bio je utvrđivanje osnovnih parametara određenog nekonvencionalnog tipa kočnice, utvrđivanje mogućnosti za dalje unapređenje konstrukcije i potvrda osnovnih pretpostavki. U tu svrhu, odabrana je vrsta kočnica koja kočni moment generiše promenom u strukturi kočnog medijuma. Kao kočni medijum odabrana je vrsta pametnog materijala.

Na osnovu pregleda literature, izvršena je detaljna analiza trenutnog stanja u oblasti primene pametnih materijala sa težištem na njihovoj primeni u kočnicama. Data je osnovna podela ove vrste materijala i istaknuta glavna svojstva. Poseban akcent stavljen je na pametne tečnosti, kao podgrupu pametnih materijala. Zbog svojih prednosti: mogućnosti jednostavnog upravljanja, brzine reakcije i reverzibilnosti reološke promene, magnetoreološka tečnost je odabrana kao kočni medijum nekonvencionalnog tipa kočnice – magnetoreološka kočnica.

Na osnovu saznanja o principima rada, kočnim kapacitetima i mogućnostima za unapređenje konstrukcije magnetoreološke kočnice izvedene su osnovne hipoteze ovog istraživanja. Prva hipoteza se bazira na pretpostavci da je raspodela magnetske indukcije, u telu klasične magnetoreološke disk kočnice, kao primer otvorenog magnetskog kola, a sa aspekta generisanja kočnog momenta, nepovoljan, te da se ta raspodela može poboljšati odgovarajućim promenama u konstrukciji. Pored ove, navedene su još dve hipoteze u kojima je istaknuto da bi se u slučaju primene paramagnetskog materijala u konstrukciji magnetoreološke kočnice ostvarila bolja raspodela magnetske indukcije a zatim i uveo dodatni režim rada magnetoreološke tečnosti. Efekti upotrebe paramagnetskog materijala u konstrukciji magnetoreološke kočnice bi bili vidljivi kroz povećanje vrednost ukupnog kočnog momenta. Provera ispravnosti navedenih hipoteza izvršena je eksperimentalnim putem i simulacijom baziranoj na metodi konačnih elemenata.

Za potrebe ovog istraživanja projektovana su i izrađena četiri prototipa čemu je prethodilo detaljno upoznavanje sa glavnim tipovima konstrukcija magnetoreoloških kočnica i predstavljanje načina projektovanja magnetskog kola. Od velikog značaja, kod magnetskog projektovanja prototipova magnetoreoloških kočnica, bili su podaci o magnetskim svojstvima predloženih vrsta čelika. Ovi podaci su, takođe, dobijeni eksperimentalnim putem. Upoređene su dve vrste čelika, C15E i 11SMn30. Iako je postojala značajna razlika u hemijskom sastavu ove dve vrste čelika, merenjem je ustanovljeno da su im magnetske karakteristike vrlo slične. Odluka o upotrebi isključivo jedne vrste čelika, čelika C15E, u daljem istraživanju, doneta je na osnovu njene dostupnosti u odgovarajućim dimenzijama i količinama.

Nakon određivanja magnetskih svojstava čelika, konstrukcijskih ograničenja i kočnih kapaciteta predloženog tipa magnetoreološke kočnice, izrađena su prva dva prototipa – preliminarni prototipovi. Za svaki preliminarni prototip urađena je posebna serija merenja vrednosti komponenti ukupnog kočnog momenta. Dobijeni rezultati su upoređeni i analizirani. Iskustva stečena tokom izrade preliminarnih prototipova i analize dobijenih rezultata naknadno su iskorišćena su tokom projektovanja finalnog prototipa – prototipa 1. Prototip 1 je predviđen za eksperimentalnu potvrdu osnovnih pretpostavki ovog istraživanja. Zbog nepostojanja modela magnetoreološke kočnice istih ili sličnih geometrijskih, konstrukcionih i magnetskih parametara, sa čijim rezultatima bi se izvršilo poređenje rezultata prototipa 1, odlučeno je da se izradi dodatni prototip magnetoreološke kočnice –

prototipa 2. Prototip 2 je model klasične magnetoreološke disk kočnice u čijoj konstrukciji nepostoji paramagnetski materijal. Izuzev paramagnetskog materijala, oba prototipa su bila tipa disk, istih geometrijskih parametara, izrađena od iste vrste čelika. Prototip 2 je upotrebljen za određivanje referentnih vrednosti komponenti ukupnog kočnog momenta.

Izmerene vrednosti komponenti ukupnog kočnog momenta prototipova 1 i 2, međusobno su upoređene. Posebno su poređene ostvarene vrednosti frikcione i viskozne komponente. Pojedinačne vrednosti ovih komponenti se nisu menjale tokom merenja i bile su približno jednake kod oba prototipa. Razlika je ostvarena isključivo u vrednosti indukovane komponente kod prototipa 1, za sve vrednosti upravljačkih struja. Na osnovu ovih rezultata došlo se do zaključka da je upotreba paramagnetskog materijala, u odgovarajućim oblastima konstrukcije kočnice, dovela do značajnog povećanja vrednosti ukupnog kočnog momenta. Ovaj zaključak potvrđuje prve dve hipoteze ovog istraživanja.

Nakon poređenja vrednosti indukovanih komponenti prototipa 1 i prototipa 2, izvršeno je njihovo poređenje sa vrednostima indukovanih komponenti dobijenih numeričkim putem preko virtuelnih modela prototipa 1 i prototipa 2. Virtuelni modeli izrađeni su u programskom paketu *Comsol Multiphysics*. Vrednosti indukovanih komponenti, za sve vrednosti upravljačke struje, indirektno su određene preko ostvarenih vrednosti magnetskog polja i magnetske indukcije u sloju magnetoreološke tečnosti.

Poređenjem dobijenih vrednosti indukovanih komponenti prototipova 1 i 2 sa vrednostima indukovanih komponenti virtuelnih modela ustanovljeno je da postoji određeno odstupanje. Ovo odstupanje, izraženo relativnim odstupanjem, iznosilo je približno 8% za prototip 1 i približno 2,5% za prototip 2. Odstupanje se pripisuje malim razlikama u sastavu materijala korišćenim za izradu prototipova i materijala definisanih u programskom paketu *Comsol Multiphysics*, a zatim i postojanju razlike između stvarnog namotaja i virtuelnog modela namotaja.

Naknadnom analizom raspodele magnetskog polja i magnetske indukcije u telu virtuelnog modela prototipa 1, ustanovljeno je da ne postoje nepredviđene promene njihovih vrednosti, strogo posmatrano, u okolini temena diska. Ovo je posebno jasno i vidljivo u grafičkoj prezentaciji rezultata promene vrednosti magnetskog polja i magnetske indukcije u odnosu na radijalnu koordinatu. Postojanje magnetskih mostova jasno je vidljivo u slučaju promene vrednosti magnetske indukcije duž r ose modela prototipa 2. Na osnovu svega ovoga zaključuje se da ne postoji potvrda za treću hipotezu ovog istraživanja, te da nije dokazano kombinovanje radnih režima magnetoreološke tečnosti.

Na osnovu svega do sada navedenog, može se zaključiti da je uvođenjem paramagnetskog materijala na odgovarajuća mesta u konstrukciji klasične magnetoreološke disk kočnice ostvarena povoljnija raspodele magnetske indukcije, što je direktno dovelo do povećanja vrednosti indukovane komponente ukupnog kočnog momenta.

Pravci budućih istraživanja će biti usmereni ka daljem istraživanju konstrukcija magnetoreoloških kočnica a poseban akcent će se staviti na razvoj konstrukcije T-rotor tipa kočnice. Smatra se da ovde postoji mogućnost za nova unapređenja. Neophodan je i dodatni rad na poboljšanju rešenja zaptivanja komornog prostora kao i na načinu odvođenju toplote. Takođe, neophodno je povećati preciznost izrade, posebno kada je u pitanju veličina procepa sa MR tečnošću.

9. Literatura

- [1] Todorović, B. J., 1988, *Kočenje motornih vozila*. Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, Srbija.
- [2] More, T. A., 2009, *MR fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device*. Ph.D. thesis, Faculté des Sciences Appliquées, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium.
- [3] Li, W. H. and Du, H., 2003, Design and experimental evaluation of a magnetorheological brake. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 21(7), pp. 508 – 515.
- [4] Rabinow, J., 1948, The magnetic fluid clutch. *American Institute of Electrical Engineers Transactions*, 67, pp 1308–1315.
- [5] Rabinow, J., 1951, *Magnetic fluid torque and force transmitting device*, U.S. Pat. 2,575,360.
- [6] Clifford, M. F., *Automotive engineering lightweight functional and novel materials. Series in materials science and engineering*. Florida: Taylor & Francis Group. 2008. Ch. 8 Smart materials. pp. 87 – 108. ISBN 987-0-7503-1001-7.
- [7] Milosavljević, A, Kotov, A. i Todorović, R., 2011, Pametni materijali - legure koje pamte svoj oblik. *Bakar*, 36(1), pp 39 – 44.
- [8] Šimšić, V., i Šimšić, Ž., 2011, Vibraciona kontrola inteligentnim strukturama. *6. Međunarodni simpozijum: Tehnologija, informatika i obrazovanje za društvo učenja i znanja*. Čačak, Srbija 3-5 jun, 2011. Tehnički fakultet Čačak.
- [9] Ćubela, D., 2002, Legure koje pamte svoj oblik. *Mašinstvo*, 2(6), pp. 83 – 92.
- [10] Senkal, D., 2009, *Hepatic surgical aid system with magnetorheological brakes for dental implants*. MSc thesis, Washington state University, Vancouver, USA.
- [11] Mazlan, S. A. B., 2008, *The behaviour of magnetorheological fluids in squeeze mode*. Ph.D. thesis, Dublin city University, Dublin, United Kingdom.
- [12] Guldbakke. M. J., & Hesselbach J., 2006, Development of bearings and a damper based on magnetically controllable fluids. *Journal of physics: Condensed matter*, 18, pp. S2959 – S2972.
- [13] Ahn Y. K., Yang, B. S., Ahmadian, M, & Morishita, S., 2005, A small-sized variable-damping mount using magnetorheological fluid. *Journal of intelligent material systems and structures*, 16, pp 127-133. 2005.
- [14] Chen, J. Z. & Liao, W. H., 2010, Design, testing and control of a magnetorheological actuator for assistive knee braces. *Smart materials and structures*, 19, pp. 1 – 10.
- [15] Gudmundsson, K. H., Jonsdottir, F. & Thorsteinsson F., 2010, A geometrical optimization of a magneto-rheological rotary brake in a prosthetic knee. *Smart materials and structures*, 19(035023). pp. 1 – 11.
- [16] Han, Y. M., Kim, C. Y. & Choi, B. S., 2009, A magnetorheological fluid-based multifunctional haptic device for vehicular instrument controls. *Smart materials and structures*, 18(015002), pp 1 – 11.
- [17] Bhavsar, R., Vaidya, Y. N., Ganguly, P., Humphreys, A., Robinsson, A., Tu, H, Wicks, N., McKinley, H. G., & Pauchet, F., 2008, Intelligence in novel materials. *Oilfield Review*, 20(1), pp. 32 – 41.

- [18] Rhyou, C., 2005, *Finite element simulation of electrorheological fluids*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, United States of America.
- [19] Culshaw, B., 2003, Smart materials. *Encyclopedia of life support systems (EOLSS): Materials science and engineering*, 3, pp. 1 – 11.
- [20] Carlson, D. & Sproston, L., 2000, Controllable fluids in 2000 - Status of ER and MR fluid technology. Actuator 2000. *Proceedings of the 7th international conference on new actuators*, Bremen, Germany, pp. 126–134.
- [21] Choi, S. B., Nam, M. H., & Lee, B. K., 2000, Vibration control of a MR seat damper for commercial vehicles. *Journal of intelligent material systems and structures*. 11(12), pp. 936 – 944.
- [22] Sproston, L., Yanyo, L., Carlson, D. & El Wahed, K., 2002, Controllable fluids in 2002 - Status of ER and MR fluid technology. Actuator 2002. *Proceedings of the 8th international conference on new actuators*, Bremen, Germany, pp. 333 – 338.
- [23] Park, C. & Jeon, D., 2002, Semiactive vibration control of a smart seat with an MR fluid damper considering its time delay. *Journal of intelligent material systems and structures*. 13(7-8), pp. 521 – 524.
- [24] Carlson, D., 2007, Semi-active vibration suppression. In *CISM Course: Semi-active vibration suppression – the best from active and passive technologies*, Udine, Italy.
- [25] Stelzer, G., Schulz, M., Kim, J. & Allemang, R. A., 2003, Magnetorheological semi-active isolator to reduce noise and vibration transmissibility in automobiles. *Journal of intelligent material systems and structures*. 14(12), pp. 743 – 765.
- [26] Barber, D. & Carlson, D., 2010, Performance characteristics of prototype MR engine mounts containing glycol MR fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*. 21(15), pp. 1509 – 1516.
- [27] Park, E. J., Stoikov, D., da Luz, L. F. & Suleman, A., 2006, A performance evaluation of an automotive magnetorheological brake design with a sliding mode controller. *Mechatronics*. 16(7), pp. 405 – 416.
- [28] Karakoc, K., Park, J. E. & Suleman, A., 2008, Design considerations for an automotive magnetorheological brake. *Mechatronics*. 18(8), pp. 434 – 447.
- [29] Jaindl, M., Köstinger, A., Magele, Ch. & Renhart, W., 2007, Optimal design of a disk type magnetorheological fluid clutch. *Elektrotechnik & Informationstechnik*. 124(7-8), pp. 266 – 272.
- [30] Bansbach, E. E., 1998, *Torque transfer apparatus using magnetorheological fluids*. U.S. Pat. 5,779,013.
- [31] Nam, T. H. & Ahn, K. K., 2009a, A new structure of a magnetorheological brake with the waveform boundary of a rotary disk. *Smart materials and structure*. 18(11), (115029).
- [32] Sarkar, C. & Hirani, H., 2015, Design of magnetorheological brake using parabolic shaped rotating disk. *International journal of current engineering and technology*. 5(2), pp. 719 – 724.
- [33] Assadsangabi, B., Daneshmand, F., Vahdati, N., Eghtesad, M. & Bazargan-Lari, Y., 2011, Optimization and design of disk-type MR brakes. *International journal of automotive technology*. 12(6), pp. 921 – 932.
- [34] Karakoc, K., 2007, *Design of a magnetorheological brake system based on magnetic circuit optimization*. MSc. thesis, University of Victoria, British Columbia, Canada.

- [35] Park, E., Falcao, L. & Suleman, A., 2008, Multidisciplinary design optimization of an automotive magnetorheological brake design. *Computers and structures*. 86(3-5), pp. 206 – 216.
- [36] Benetti, M. & Dragoni, E., 2006, Nonlinear magnetic analysis of multi-plate magnetorheological brakes and clutches. *Proceedings of the COMSOL users conference*. Milano, Italy, pp. 1 – 5.
- [37] Rizzo, R., Musolino, A., Bucchi, F., Forte, P. & Frenzo, F., 2014, Magnetic design and experimental validation of an innovative fail-safe magnetorheological clutch excited by permanent magnets. *IEEE transactions on energy conversion*. 29(3), pp. 628 – 640
- [38] Thanikachalam, J. & Nagaraj, P., 2015, On the fabrication of magnetorheological brake with optimum design factors. *International conference on systems, science, control, communication, engineering and technology*. pp. 55 – 63.
- [39] Trabia, S., 2014, *Analytical and experimental analysis of magnetorheological elastomers*. MSc. thesis, University of Nevada, Las Vegas. USA.
- [40] Bego, V., 1975, *Mjerenja u elektrotehnici*, Četvrto dopunjeno izdanje, Tehnička knjiga Zagreb.
- [41] Poznić, A., Zelić, A. i Miloradović, D., 2015, Determination of magnetic characteristics of some steels suitable for magnetorheological brake construction. *Proceeding of 3rd International conference & workshop, mechatronics in practice and education, MECHEDU*. Subotica, Serbia. 14th – 16th May. Str. 130 – 133.
- [42] Lita, M., Han, A. & Susan-Resiga, D. 2009. Characterization of sedimentation and high magnetic field flow behavior of some magnetorheological fluids. *Proceedings of the 11th conference on electrorheological fluids and magnetorheological suspensions. Journal of Physics: Conference Series*, 149(1), (012071).
- [43] Shah, K., Phu, D. X., Seong, M. S., Upadhyay, R. V. & Choi, S. B., 2014, A low sedimentation magnetorheological fluid based on platelike iron particles, and verification using a damper test. *Smart materials and structures*. 23(2), (027001).
- [44] Premalatha, E. S., Chokkalingam, R. & Mahendran, M., 2012, Magneto mechanical properties of iron based mr fluids. *American journal of polymer science*. 2(4), pp. 50 – 55.
- [45] Lampe, D., Thess, A. & Dotzauer, C., 1998, MRF clutch – design considerations and performances. *Proceedings of the 6th International conference on new actuators*, Bremen, Germany, pp. 449 – 453.
- [46] Nam, T. H. & Ahn, K. K., 2009b, New approach to designing an MR brake using a small steel roller and MR fluid. *Journal of mechanical science and technology*. 23(7), pp. 1911 – 1923.
- [47] Shiao, Y. & Nguyen, Q., 2013, Development of a multi-pole magnetorheological brake. *Smart materials and structures*. 22(6), (065008).
- [48] Senkal, D. & Gurocak, H., 2009, Spherical brake with MR fluid as multi degree of freedom actuator for haptics. *Journal of intelligent material systems and structures*. 20(18), pp. 2149 – 2160.
- [49] Park, Y. & Jung, B., 2003, Development of damper for new electronically controlled power steering system by magneto-rheological fluid: MRSTEER. *International journal of vehicle design*. 33(1–3), pp. 102 – 113.
- [50] Nam, Y., Moon, Y. & Park, M., 2008, Performance improvement of a rotary MR fluid actuator based on electromagnetic design. *Journal of intelligent material systems and structures*. 19(6), pp. 695 – 705.

- [51] Goncalves, F. & Carlson, D., 2009, An alternate operation mode for MR fluids – magnetic gradient pinch. *Proceedings of the 11th conference on electrorheological fluids and magnetorheological suspensions*. Dostupno na: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/149/1/012050/pdf>. Pristupljeno: 29. 02. 2016.
- [52] Huang, J., Zhang, J. Q., Yang, Y. & Wei, Y. Q., 2002, Analysis and design of a cylindrical magneto-rheological fluid brake. *Journal of materials processing technology*. 129(1-3), pp. 559 – 562.
- [53] Wereley, H., 2008, Nondimensional Herschel–Bulkley analysis of magnetorheological and electrorheological dampers. *Journal of intelligent material systems and structures*, 19(3), pp 257 – 268.
- [54] Farjoud, A., Vahdati, N. & Fah, Y. F., 2008, MR-fluid yield surface determination in disc-type MR rotary brakes. *Smart materials and structures*. 17(3), (035021).
- [55] Carlson, D. & Jolly M., 2000, MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics*. 10(4-5). pp 555 – 569.
- [56] Odenbach, S., 2013, *Characteristics of ferrofluid APG 513 A. Ferrofluid database*. Dostupno na <http://www.maschinenbau.tu-ilmeneau.de/mb/wwwtd/hydromag/ferro/old/FerrofluidDatabase/APG513.html>. Pristupljeno 21.6.2013.
- [57] Hartsock, L. D., Novak, F. R. & Chaundy, J. G., 1991, ER fluid requirements for automotive devices. *Journal of rheology*. 35(7), pp 1305 – 1327.
- [58] Popplewell, J., 1984, Technological applications of ferrofluids. *Physics in technology*. 15(3). pp 150 – 156.
- [59] Rankin, J. P., Ginder, M. J. & Klingenberg, J. D., 1998, Electro- and magneto-rheology. *Current opinion in colloid & interface science*. 3(4), pp 373 – 381.
- [60] Rankin, J. P. & Klingenberg, J. D., 1998, The electrorheology of barium titanate suspensions. *Journal of rheology*. 42(3). pp 639-656.
- [61] Knežević, D. i Milašinović, A., 2010, *Mehanika fluida*. Grafič Banja Luka, Banja Luka, Federacija Bosna i Hercegovina.
- [62] Winslow, W. M., 1949, Induced fibrillation of suspensions. *Journal of applied physics*, 20(1137). pp 1137 – 1140.
- [63] Mäkelä, K. K., 1999, *Characterization and performance of electrorheological fluids based on pine oils*. Ph.D. thesis, University of Oulu, Finland.
- [64] Anonim 1. 2013, *Electrorheological fluid ERF-3S-I, Technical details*. Dostupno na: http://www.ssslabs.com/ehtml/4_1.php. Pristupljeno: 07. 06. 2013.
- [65] Block, H. & Kelly P. J., 1988, Electro-rheology. *Journal of physics d: applied physics*. 21(12). pp 1661 – 1677.
- [66] Tian, H., 2005, *Electrorheological fluids*. Elsevier Inc. Amsterdam, Netherland.
- [67] Wong, C. E., 1998, *Electrorheological fluid interfaces in mechatronic devices*. Ph.D. thesis, University of Hong Kong, Hong Kong, Peoples Republic of China.
- [68] Sami, A., 2013, *LID3354d – Technical information sheet. Smart technology limited*. Dostupno na: <http://www.smarttec.co.uk/res/lid3354d.pdf>. Pristupljeno: 06. 06. 2013.

- [69] Anonim 2. 2013, *Electrorheological fluid GER, Technical details*. Dostupno na: http://www.smartmaterials.hk/product/erf/data/erf_data.html. Pristupljeno: 06. 06. 2013.
- [70] Odenbach, S., 2004, Recent progress in magnetic fluid research. *Journal of physics: condensed matter*. 16(32), pp R1135 – R1150.
- [71] Vékás, L., 2004, Magnetic nanofluids properties and some applications. *Romanian journal of physics*. 49(9-10), pp 707 – 721.
- [72] Papell, S. S., 1965. Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles. U.S. Pat. 3,215,572.
- [73] Anonim 3. 2013, *Ferrofluids*. Dostupno na: <http://fias.uni-frankfurt.de/~simbio/Ferrofluids>. Pristupljeno: 14. 06. 2013.
- [74] Scherer, C. & Figueiredo, N. A. M., 2005, Ferrofluids: properties and applications. *Brazilian journal of physics*. 35(3A), pp 718 – 727.
- [75] Anonim 4. 2013, *Ferrofluid EMG 304, Technical details*. Dostupno na: http://ferrofluid.ferrotec.com/index.php?id=audioFluid&vfp_id=102. Pristupljeno: 11. 06. 2013.
- [76] Anonim 5. 2013, *FluidMag-Amine. Technical details*. Dostupno na: http://www.chemicell.com/products/nanoparticles/docs/PI_fluidMAG-Amine_4121.pdf. Pristupljeno 17. 06. 2013.
- [77] Lemarquand, V. & Lemarquand, G., 2011, Ferrofluid seals. In *New tribological ways*, ed. Ghrib, T., InTech. Croatia, pp. 91 – 114.
- [78] Kuzhir, P., 2008, Free boundary of lubricant film in ferrofluid journal bearings. *Tribology international*. 41(4), pp 256 – 268.
- [79] Brewster, H. D., 2010, *Electromagnetism*. Oxford Book Company, Jaipur, Rajasthan, India. 2010.
- [80] Chhabra, R. P. & Richardson, J. F., 2008, *Non-Newtonian flow and applied rheology, Engineering applications. Second Edition*. Elsevier. Hungary.
- [81] Bukurov, M. i Bikić S., 2014, *Nenjutnovski fluidi*. Skripta iz predmeta: Mehanika fluida 2. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [82] Genç, S. & Phulé, P., 2002, Rheological properties of magnetorheological fluids. *Smart materials and structures*. 11(1), pp 140 – 146.
- [83] Wang, J. & Meng, G., 2001, 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*. 215(3), pp 165 – 174.
- [84] Kavlicoglu, B. M., Gordaninejad, F., Evrensel, C. A., Cobanoglu, N., Liu, Y., Fuchs, A. & Korol, G., 2002, High-torque magneto-rheological fluid clutch. *Proceedings of SPIE conference on smart materials and structures*, San Diego, USA.
- [85] Arrasmith, S. & Jacob, S. D., 1999, Development of new magnetorheological fluids for polishing CaF₂ and KDP. *Laboratory for laser energetics review*. 80. pp 213 – 219.
- [86] Jian-Ming, J., 2010, *Theory and computation of electromagnetic fields*. IEEE press & John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, USA.
- [87] Popović, B., 1983, *Osnovi elektrotehnike 2*. Građevinska knjiga, Beograd.

- [88] Popović, Z. & Popović B., 2000. *Introductory Electromagnetics*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- [89] Farjoud, A., Yahdati, N. & Fah, Y. F., 2007, A mathematical model of drum-type MR brakes using Herschel-Bulkley shear model. *Journal of intelligent material systems and structures*. 19(5), pp 565 – 572.
- [90] Kieburg, C., 2010, *MR-fluid Basonetic® 5030, technical information*. BASF SE, Metall Systems. Ludwigshafen, Germany.
- [91] Anonim 6. 2013, *MRF-122-2ED Magnetorheological fluid*. Dostupno na: <http://edge.rit.edu/content/P07307/public/LORD%20MR%20Fluid>. Pristupljeno 26. 07. 2013.
- [92] Anonim 7. 2013, *SF-ZY3201CF Magnetorheological fluid*. Dostupno na: <http://www.ioniqa.com/filesDownload/Technical%20Data%20sheet%20SF-ZY3201CF.pdf>. Pristupljeno 26. 07. 2013.
- [93] Butz, T. & von Stryk, O. 1998, Modelling and simulation of ER and MR fluid dampers. *ZAMM - Journal of applied mathematics and mechanics / Zeitschrift für angewandte mathematik und mechanik*. 78(0), pp. 1 – 22.
- [94] Bukurov, Ž., 1987, *Mehanika fluida*. Komisija za izdavačku delatnost Instituta za hidrauliku i saobraćaj Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.
- [95] Jolly, M., Bender, W. J. & Carlson, D., 1999, Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*. 10(1), pp 5 – 13.
- [96] Varela-Jimenez, I. M, Vargas Luna, L. J., Cortes-Ramirez A. J. and Song, G. 2015. Constitutive model for shear yield stress of magnetorheological fluid based on the concept of state transition, *Smart Materials and Structures*, 24 (4), pp. 1-7.
- [97] Spencer, Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. & Carlson, D., 1997, Phenomenological model of a magnetorheological damper. *Journal of engineering mechanics*, 123(3), pp. 230 – 238.
- [98] Gamota, D. R. & Filisko, F. E., 1991, Dynamic mechanical studies of electrorheological materials: moderate frequencies. *Journal of rheology*. 35(399), pp. 399 – 425.
- [99] Milosavljević, M. J. M., 2012, *Zenerov model viskoelastičnosti za ortotropno čvrsto telo i njegova primena u mehanici drveta*. Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu. Šumarski fakultet.
- [100] Wen, K. Y., 1976, Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of engineering mechanics division ASCE*. 102(EM2), pp 249 – 263.
- [101] Wei, Z., Chee-Meng, C. & Geok-Soon, H., 2007, Development of a compact double-disk magneto-rheological fluid brake. *Robotica*. 25(4), pp 493 – 500.
- [102] Lange, U., Richter, L. & Zipser, L., 2001, Flow of magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*. 12(3), pp 161 – 164.
- [103] Verma, S., Kumar, N. & Kuma, A., 2013, Design analysis of variable damping mechanism using magnetorheological fluids for adaptive prosthetic foot. *Journal of scientific & industrial research*. 72(4), pp 213 – 216.
- [104] Yoo, J-H. & Wereley, M. N., 2002, Design of a high-efficiency magnetorheological valve. *Journal of intelligent material systems and structures*. 13(10), pp 679 – 685.

- [105] Carlson, D. 1999, Magnetorheological fluid actuators. In *Adaptronics and smart structures, Basic materials, design and applications*, ed. Janocha, H., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 180 – 195.
- [106] Gopalswamy, S. & Jones, L. G., 1998, *Magnetorheological transmission clutch*, U.S. Pat. 5,823,309.
- [107] Carlson, D., 1996, *Multi-degree of freedom magnetorheological devices and systems for using some*. U.S. Pat. 5,492,312.
- [108] Jha, S. & Jain, V. K., 2009, Rheological characterization of magnetorheological polishing fluid for MRAFF. *International journal of advanced manufacturing technology*. 42(7-8). pp 656 – 668.
- [109] Kordonski, W. & Golini, D., 2002, Multiple application of magnetorheological effect in high precision finishing. *Journal of intelligent material systems and structures*. 13(7-8), pp 401 – 404.
- [110] Gorodkin, S. R. & Kordonski, W. 1995, Magneto-rheological fluid seal. *Proceedings of the 5th international conference ER fluids and MR suspensions*. World scientific publication. Sheffield, UK. pp. 704 – 709.
- [111] Zainordin, Z. A., Abdullah, A. M. & Hudha, K., 2013, Experimental evaluations on braking responses of magnetorheological brake, *International journal of mining, metallurgy & mechanical engineering*. 1(3), pp. 195 – 199.
- [112] Bullion, C. & Gurocak, H., 2009, Haptic glove with MR brakes for distributed finger force feedback. *Presence*. 18(6), pp. 421 – 433.
- [113] Anonim 8. 2013, *Leg brace with MR fluid brake*. Dostupno na: <http://www.hashimoto-r.co.jp/home.html>. Pristupljeno: 31. 07. 2013.
- [114] Anonim 9. 2013, *Design & development, equipment gear mechanism*. Dostupno na: <http://mrfengineering.com.ua/magnytoreologycheskaya-zhydkost/oblasty-prymenyeya/drugye-razrabotky?lang=en>. Pristupljeno: 31. 07. 2013.
- [115] Anonim 10. 2013, *Lord corporation expands production of steer-by-wire TDF brakes to meet demand*. Dostupno na: <http://www.mhnetwork.com/news/lord-corporation-expands-production-of-steer-by-wire-tfd-brakes-to-meet-demand/>. Pristupljeno: 30. 07. 2013.
- [116] Poznić A, Časnji F, i Stojić B., 2012, Design considerations for magnetorheological disk brake. *Proceedings of the 7th international symposium machine and industrial design in mechanical engineering - KOD 2012*. 24th – 26th May 2012. Balatonfüred. Hungary.
- [117] Coey, D. M. J., 2009, *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge university press. Cambridge, UK.
- [118] Spasojević, A. Ž. i Popović, V. Z., 1979, *Elektrotehnički i elektronski materijali*. Naučna knjiga - Beograd. Aktom Univerziteta u Beogradu br. 06-1529/1 od 23. avgusta 1979. godine štampano kao univerzitetski udžbenik.
- [119] Marjanović, J., 2011, *Basic principles of over unity electromagnetic machines*. Veljko Milkovic research & development center, Novi Sad.
- [120] Popović, B., 1990, *Osnovi elektrotehnike I*. Građevinska knjiga, Beograd.
- [121] Ajide, Makinde, A. F., 2011, Microstructural analysis of selected corroded materials from nigeria oil and gas industry. *American journal of materials science*. 1(2), pp. 108 – 112.

- [122] Đorđević, V. i Brekić, M., 1987, *Inženjersko mašinski priručnik - knjiga broj 1*. Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd.
- [123] Herceg, D., Kasaš-Lažetić, K. i Prša, M., 2012, Određivanje magnetskih karakteristika nekih feromagnetskih struktura. *Zbornik radova XI međunarodnog naučno-stručnog simpozijuma Infoteh-Jahorina, 21. - 23. mart 2012*, 11, pp 104 – 107. Jahorina, Bosna i Hercegovina.
- [124] Kasaš-Lažetić, K., Herceg, D., Poznić, A., Župunski, I. i Prša M. 2015, Some experiences in an initial magnetization curve measurement. *Proceedings of the 12th International conference on applied electromagnetics - PIEC 2015*. 31th August – 2th September, 2015, Niš, Serbia.
- [125] Iskrenović, P., 2005. *Odabrana poglavlja i eksperimentalne vežbe iz elektromagnetizma, talasa i optike*. Dosije, Beograd.
- [126] Hrennikoff, A., 1941, Solution of problems of elasticity by the framework method. *Journal of applied mechanics*. 8(4), pp 169 – 175.
- [127] Winslow, A., 1966, Numerical solution of the quasilinear poisson equation in a nonuniform triangle mesh. *Journal of Computational Physics*. 1(2), pp. 149 – 172
- [128] Sekulović, M., 1988, *Metod konačnih elemenata*. Građevinska knjiga, Beograd.
- [129] Silvester, P. P, and Ferrari L.R., 1983, *Finite Elements for Electrical Engineers*, Cambridge University Press.
- [130] Nguyen, Q. H., Choi, S. B., Lee, Y. S. and Han, M. S., 2013, Optimal design of a 3D haptic gripper for telemanipulation, featuring magnetorheological fluid brake. *Smart materials and structures*. 22(015009), pp 1 – 17.
- [131] Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2012, Selection of magnetorheological brake types via optimal design considering maximum torque and constrained volume. *Smart materials and structures*. 21(015012), pp 1 – 12.
- [132] Erol, O. and Gurocak, H., 2011, Interactive design optimization of magnetorheological-brake actuators using Taguchi method. *Smart materials and structures*. 20(105027), pp 1 – 12.
- [133] Smith, I. A., Ulicny, C. J. and Lawrence, C. K., 2007, Magnetorheological fluid fan drive for trucks. *Journal of intelligent materials systems and structures*. 18(12), pp 1131 – 1136.
- [134] Choi, T. Y., Cho, U. J., Choi, S. B. and Wereley M. N. 2005. Constitutive models of electrorheological and magnetorheological fluids using viscometers. *Smart materials and structures*. 14(5), pp 1025 – 1036.
- [135] Senkal, D. and Gurocak. H., 2010, Small MR-brake with serpentine flux path and t-rotor for haptics. *Mechatronics*. 20(3), pp 377 – 383.
- [136] Bölter, R. and Janocha, H., 1997, Design rules for MR-fluid actuators in different working modes. In *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials*. San Diego, California. pp.148 – 159.
- [137] Wang, M. D., Hou, F. Y. and Tian, Z. Z., 2013, A novel high-torque magnetorheological brake with a water cooling method for heat dissipation. *Smart materials and structures*. 22(025019), pp 1 – 11.
- [138] Deffenbaugh, B. W., Herr, H. M., Pratt, G. A. and Wittig, M. B., 2001, *Electronically controlled prosthetic knee*. U.S. Pat. application 2001/0029400.

- [139] Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2010, Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat. *Smart materials and structures*. 19(115024), pp 1 – 11.
- [140] Neelakantan, A. V. and Washington, N. G., 2005, Modeling and reduction of centrifuging in magnetorheological (MR) Transmission clutches for automotive applications. *Journal of intelligent material systems and structures*. 16(9), pp 703 – 711.
- [141] Lui, B., Li, H. W., Kosasih, B. P. i Zhang, Z. X., 2006, Development of an MR-brake-based haptic device. *Smart materials and structures*. 15(6), pp. 1960 – 1966.
- [142] Poznić, A., Miloradović, D. i Juhas, A., 2017, A new magnetorheological brake's combined materials design approach. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 31(3), pp 1119-1125. DOI 10.1007/s12206-017-0210-5.
- [143] Alkan, S. M., Gurocak, H. & Gonenc, B., 2013, Linear magnetorheological brake with serpentine flux path as a high force and low off-state friction actuator for haptics. *Journal of intelligent material systems and structures*. 24(12), pp. 1701 – 1713.
- [144] Fatah, A. Y. A., Mazlan, A. S., Koga, T. & Zamzuri, H., 2016, Design of magnetorheological valve using serpentine flux path method. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 50, pp. 29 – 44.
- [145] Mohammadhossein, H., Shohel, M. & Hussein, A. A., 2014, Magnetorheological fluid based braking system using l-shaped disks, *Proceedings of the COMSOL conference, 2014, Boston*.
- [146] Lovrić, M., 2009, *Osnovi statistike*. Ekonomski fakultet u Kragujevcu
- [147] Poznić, A., Miloradović, D. i Stojić, B., 2016, On magnetorheological brake fem modeling. *Proceedings of the 9th KOD*. 9th – 12nd June, 2016, Balatonfeld, Hungary. pp. 117 – 122.

10. Prilozi

10.1. Tehnička dokumentacija drugog preliminarnog prototipa

Ova stranica je namerno ostavljena prazna

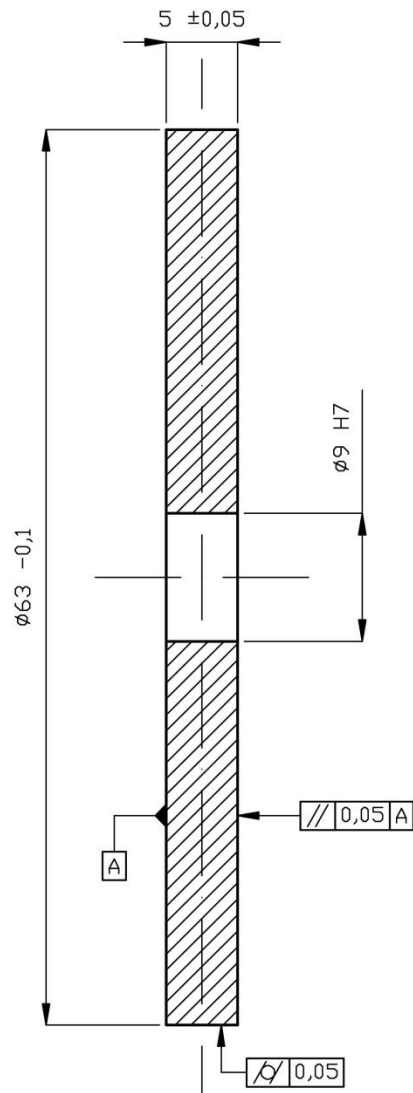
Ova stranica je namerno ostavljena prazna

∅9 H7

+0,015

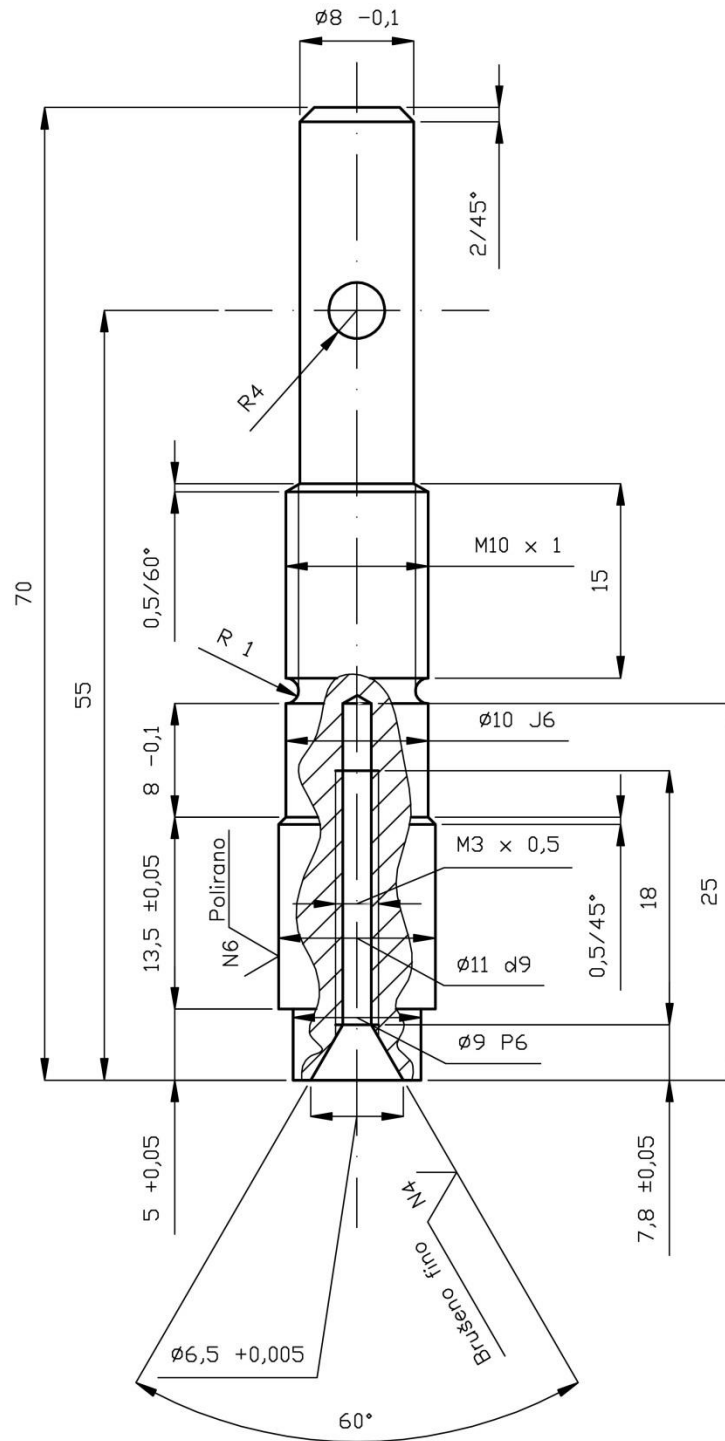
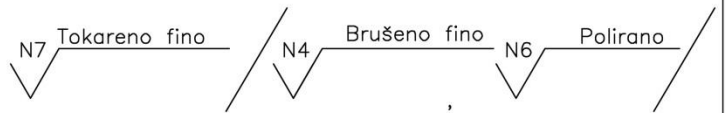
-0,0

N7 Tokareno fino



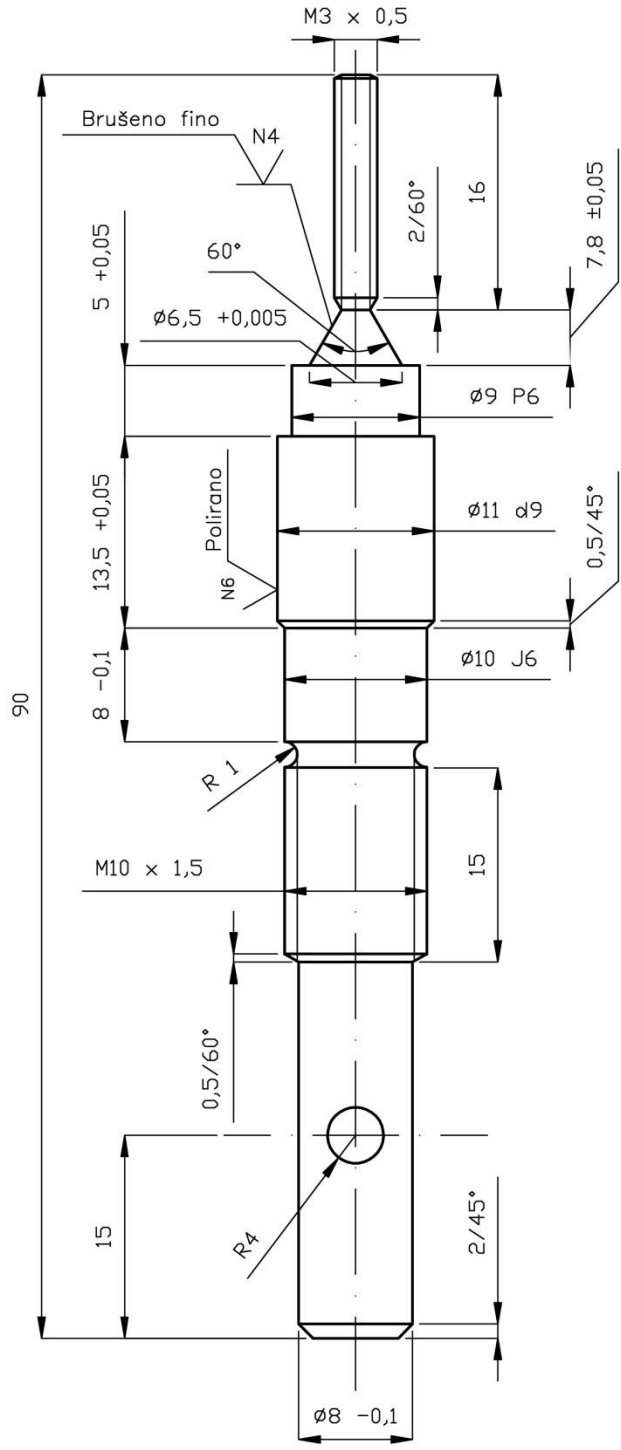
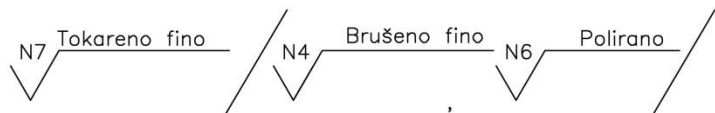
				Datum 09.04.2014.		Materijal: C15E	Razmera: 2:1
				Obrad. A. Poznić		Naziv: Disk	
				Stand.			
				Odob. A. Poznić			
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad			
				1.00.000			List:1/1
				Izvod pod.			L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Zamena za			

Ø10 J6	+0,007
	-0,002
Ø11 d9	-0,05
	-0,093
Ø9 P6	+0,024
	-0,015



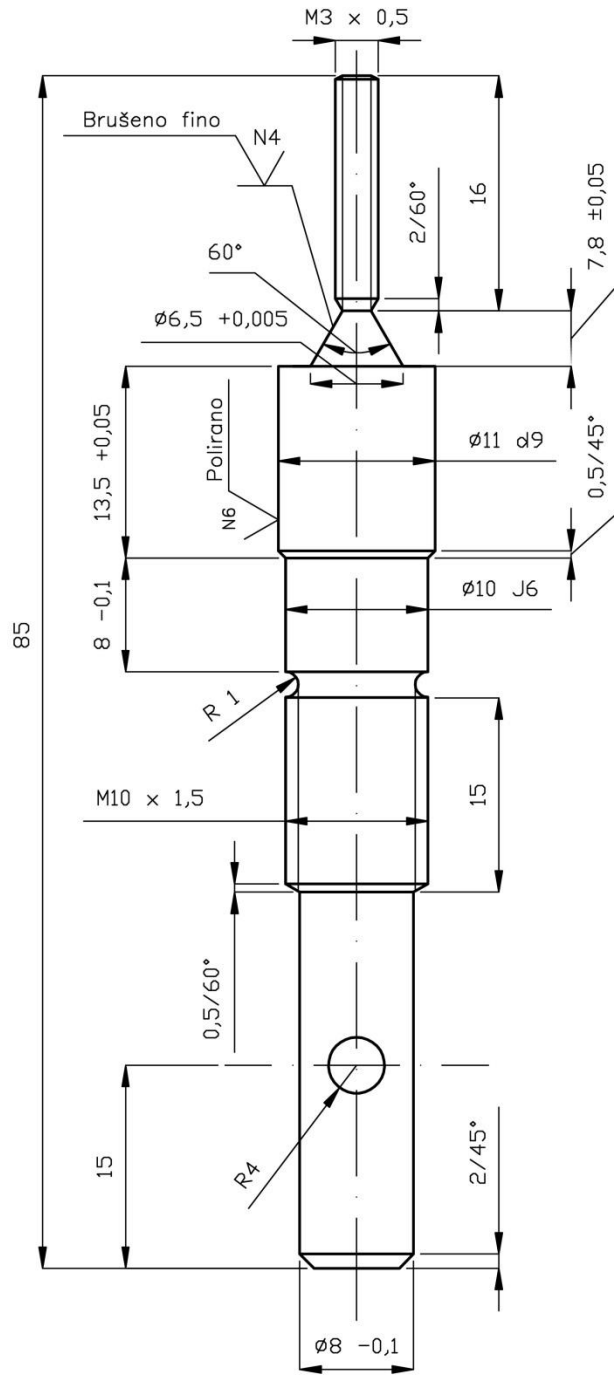
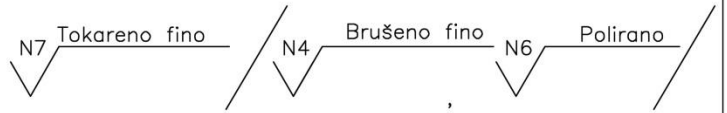
				Materijal: C15E		Razmera: 2:1	
				Datum: 09.04.2014.			
				Obrad. A. Poznić			
				Stand.			
				Odob. A. Poznić			
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad			
St.i		Izmene		Datum		Ime	
				Naziv: Prvo vratilo		List:1/1	
				2.00.000		L	
				Izvod pod.		Zamena za	

ø10 J6	+0,007
	-0,002
ø11 d9	-0,05
	-0,093
ø9 P6	+0,024
	-0,015



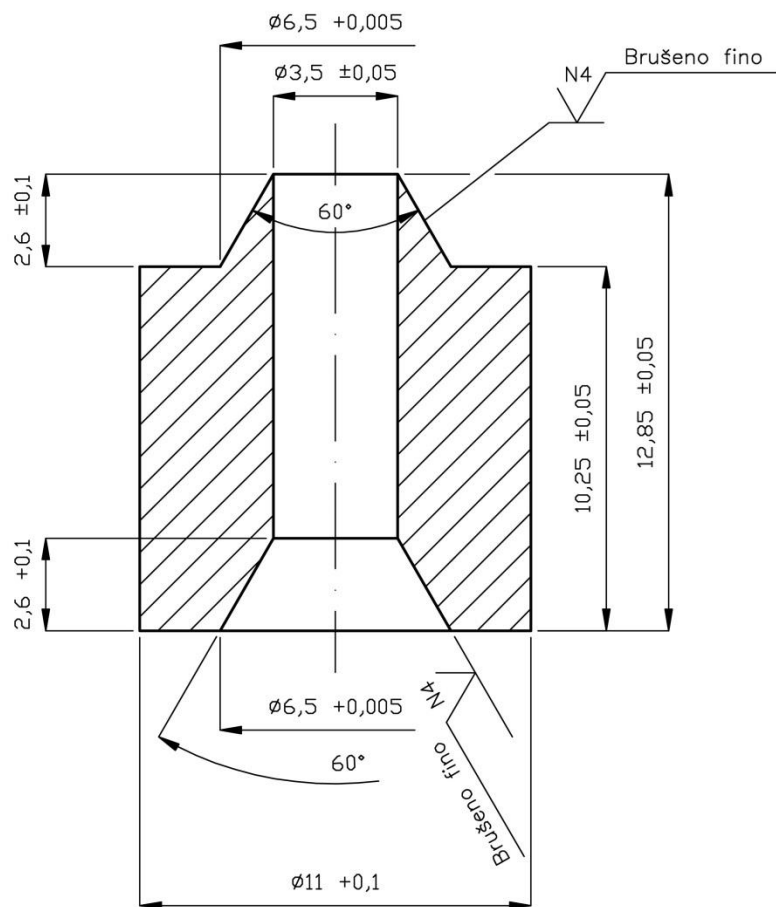
				Materijal: C15E		Razmera: 2:1	
				Datum: 09.04.2014.		Naziv: Pomoćno vratilo	
				Obrad. A. Poznić			
				Stand.			
				Odob. A. Poznić			
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		3.00.000	
						List:1/1	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	
						L	

ø10 J6	+0,007
	-0,002
ø11 d9	-0,05
	-0,093



				Materijal: C15E		Razmera: 2:1	
				Datum: 09.04.2014.			
				Obrad. A. Poznić			
				Stand.			
				Odob. A. Poznić			
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad			
				Naziv: Drugo vratilo			
				4.00.000			
				List:1/1			
				L			
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	

N7 Tokareno fino / N4 Brušeno fino



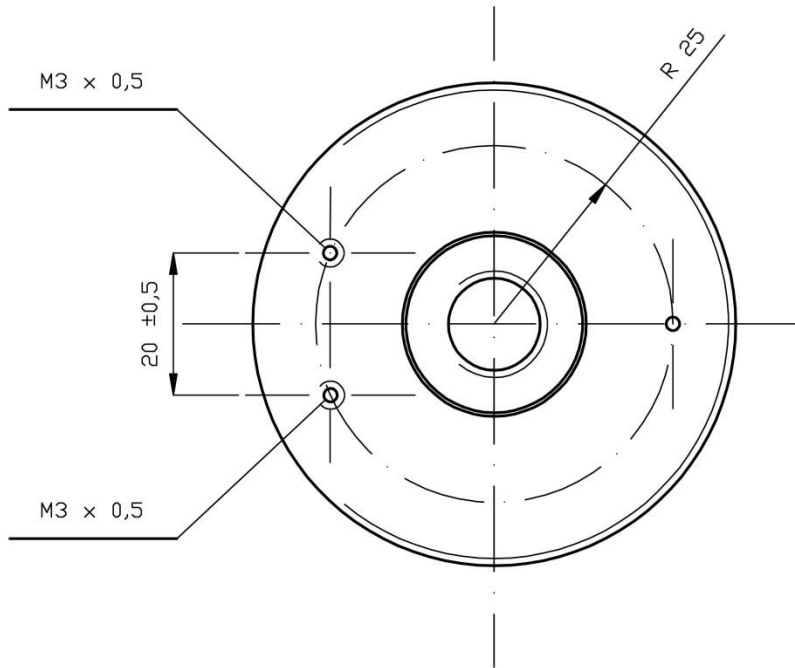
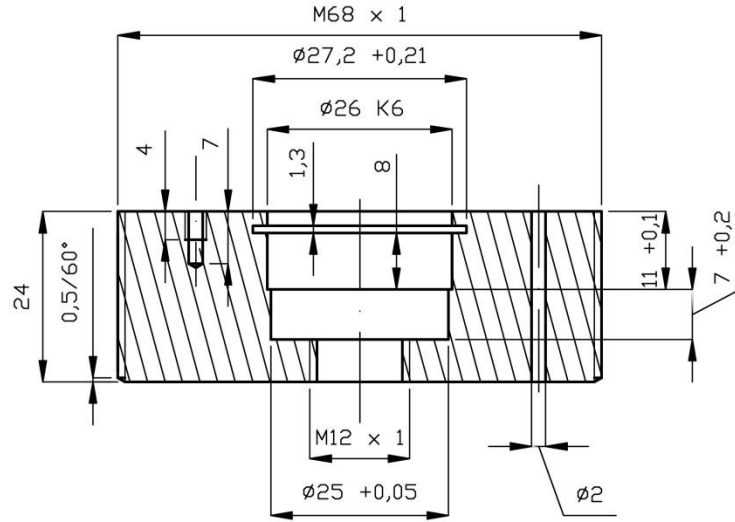
				Materijal: C15E	Razmera: 5:1
			Datum	09.04.2014.	Naziv: Odstojnik
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		5.00.000
					List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za
					L

Ø26 K6

+0,002

-0,009

N7 Tokareno fino



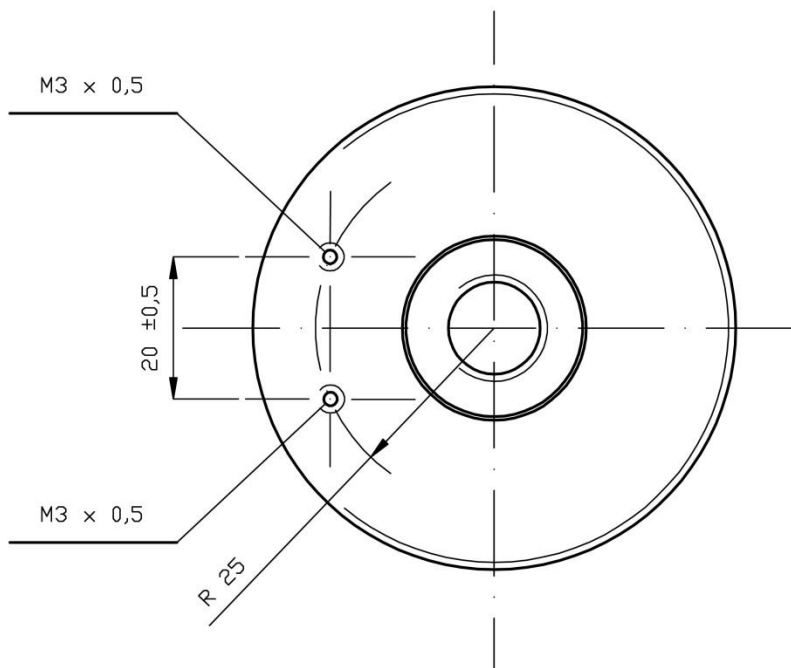
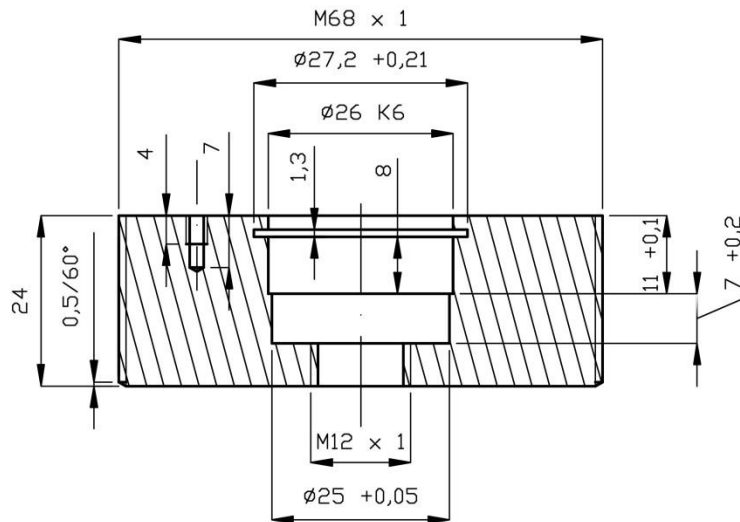
				Materijal: C15E	Razmera: 1:1
				Datum: 09.04.2014.	Naziv: Stator – levi
				Obrad. A. Poznić	
				Stand.	
				Odob. A. Poznić	
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad	6.00.000
					List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za
					L

∅26 K6

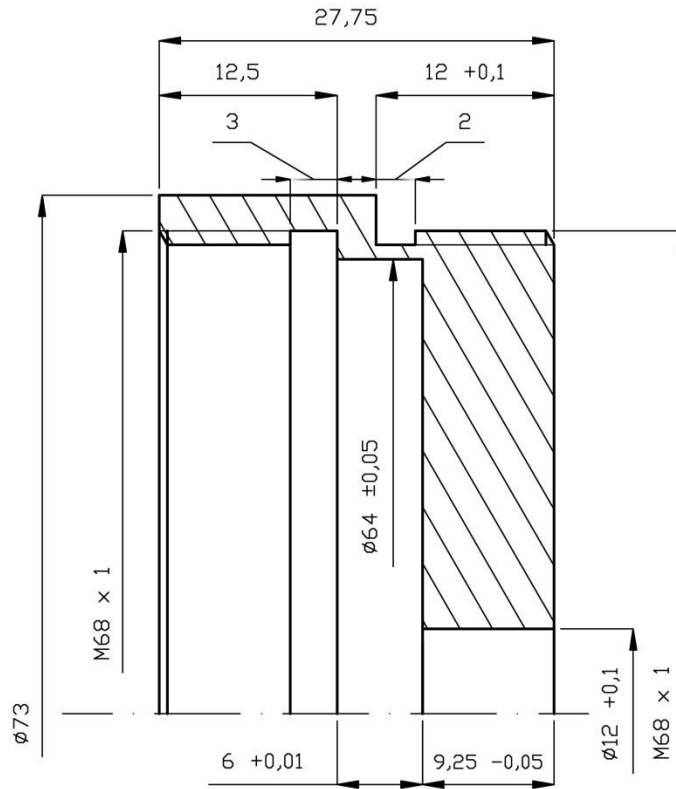
+0,002

-0,009

N7 Tokareno fino

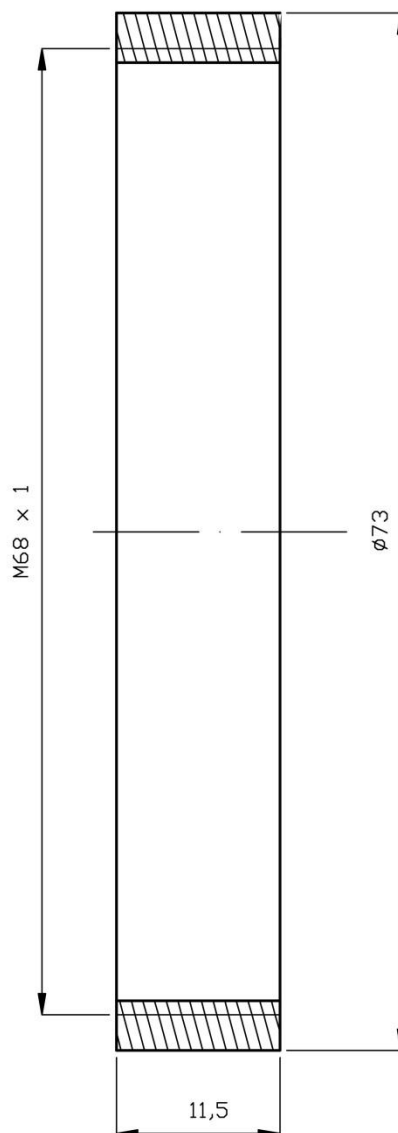


				Materijal: C15E		Razmera: 1:1	
				Datum: 09.04.2014.		Naziv: Stator – desni	
				Obrad. A. Poznić			
				Stand.			
				Odob. A. Poznić			
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		7.00.000	
						List:1/1	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	
						L	



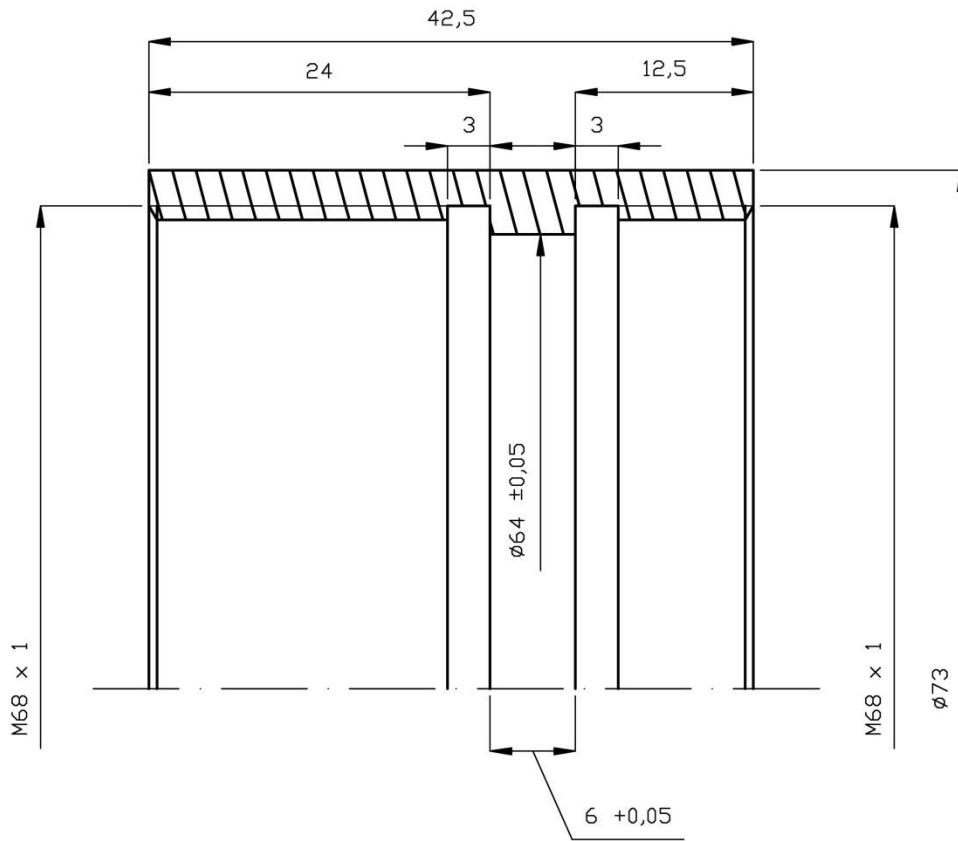
				Materijal: C15E		Razmera: 2:1	
			Datum	09.04.2014.		Naziv: Stator – srednji	
			Obrad.	A. Poznić			
			Stand.				
			Odob.	A. Poznić			
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad			8.00.000	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		List:1/1 L	
				Zamena za			

N7 Tokareno fino

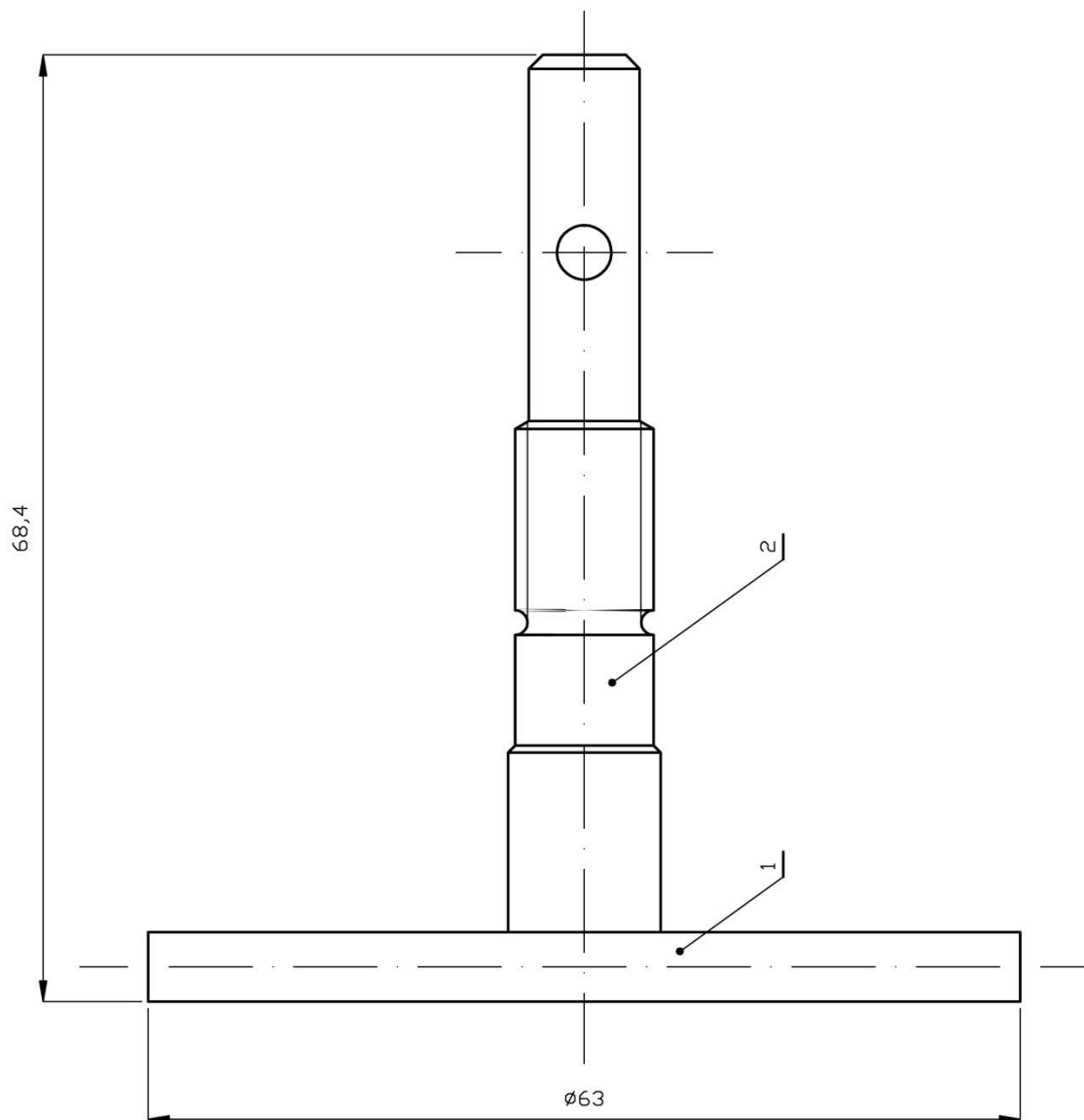


				Materijal: C15E		Razmera: 2:1	
			Datum	09.04.2014.		Naziv: Manji prsten	
			Obrad.	A. Poznić			
			Stand.				
			Odob.	A. Poznić			
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		9.00.000		
						List:1/1	
						L	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	

N7 Tokareno fino

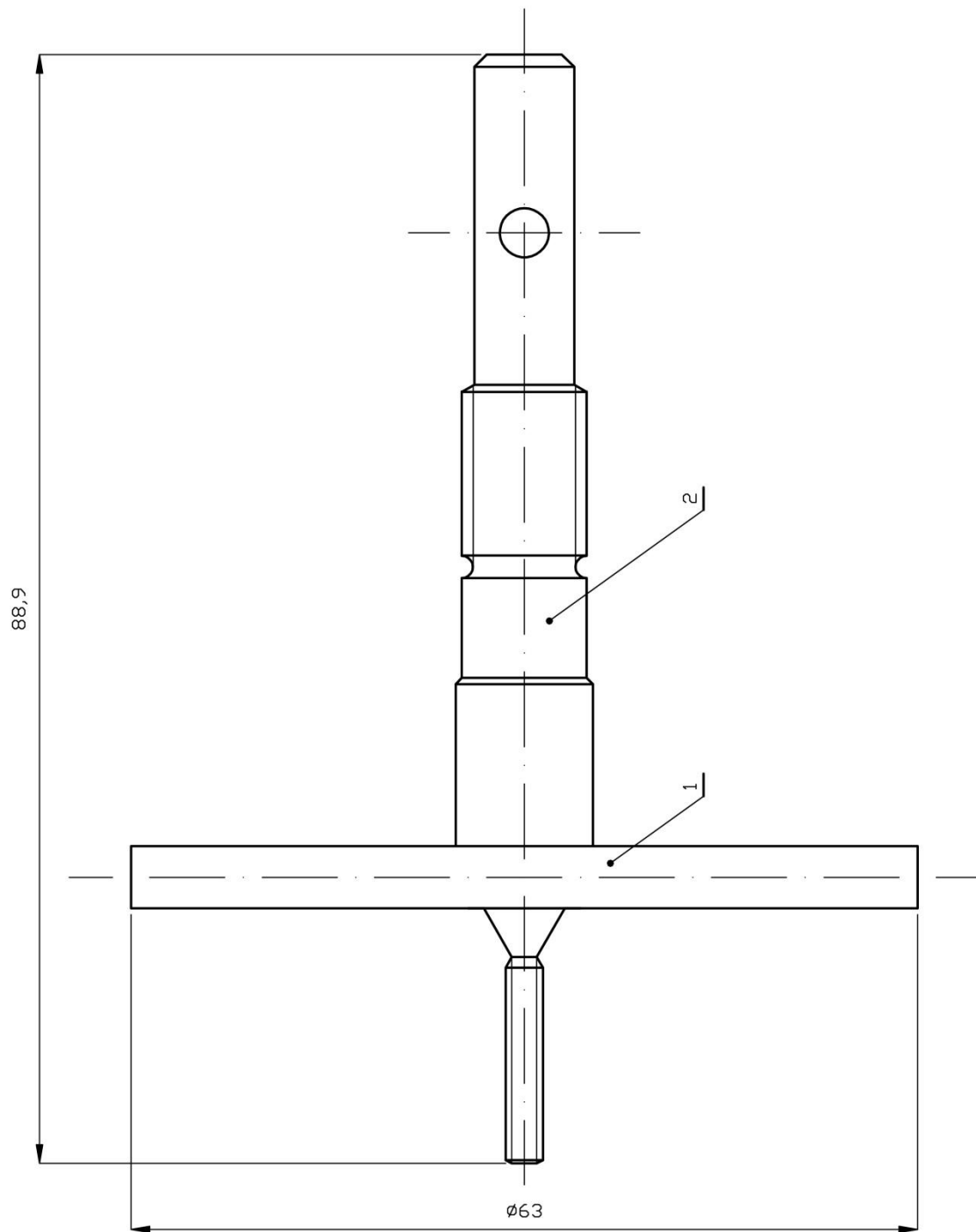


				Materijal: C15E		Razmera: 2:1		
			Datum	09.04.2014.		Naziv: Veći prsten		
			Obrad.	A. Poznić				
			Stand.					
			Odob.	A. Poznić				
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad				10.00.000	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.			List:1/1 L	
				Zamena za				



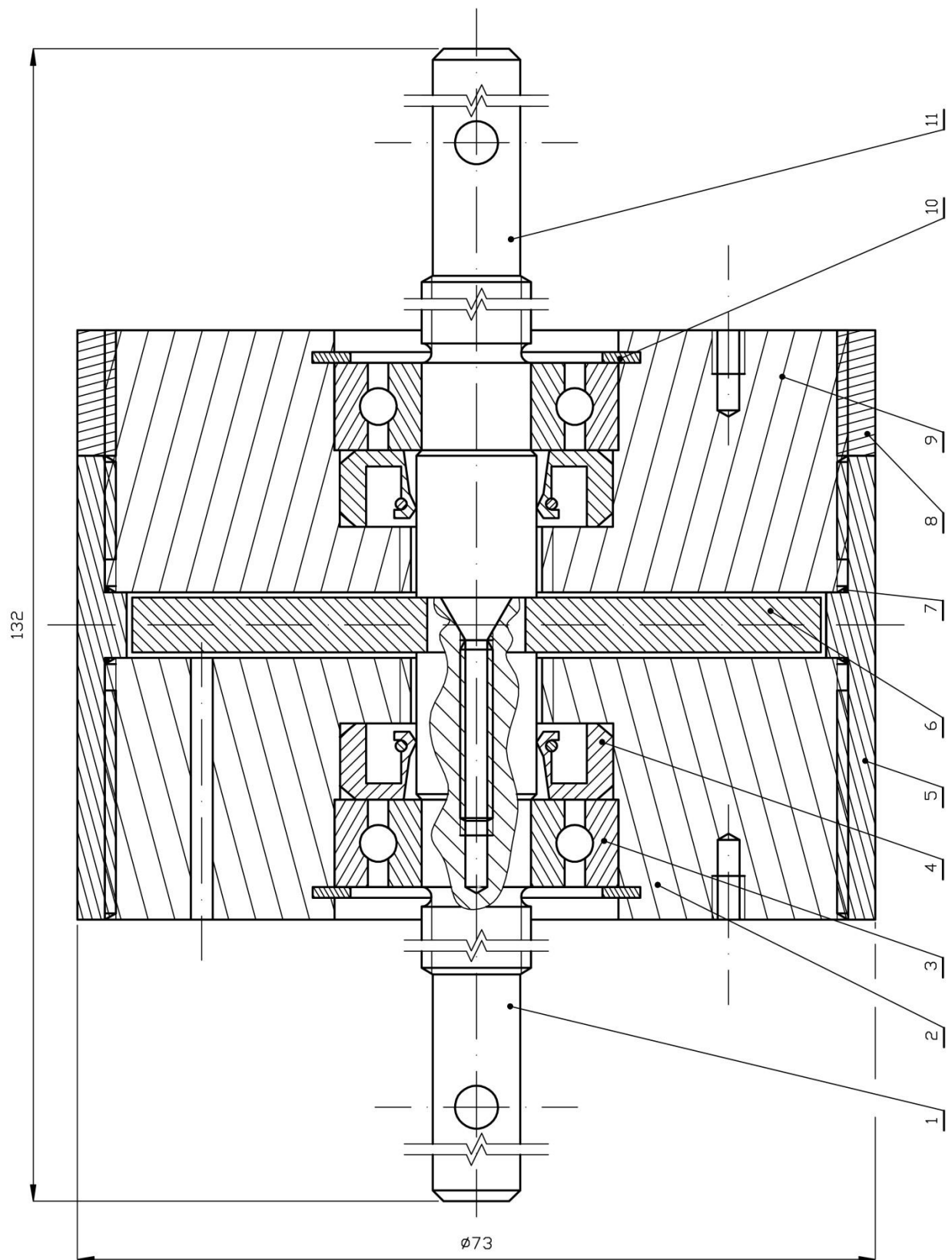
NAPOMENA: Završnu obradu oba elementa izvršiti u sklopu.

1	Prvo vratilo	C15E	1	2.00.000	-
2	Disk	C15E	1	1.00.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 2:1
			Datum	09.04.2014.	Naziv: Sklop prvi rotor
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		11.01.000
					List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

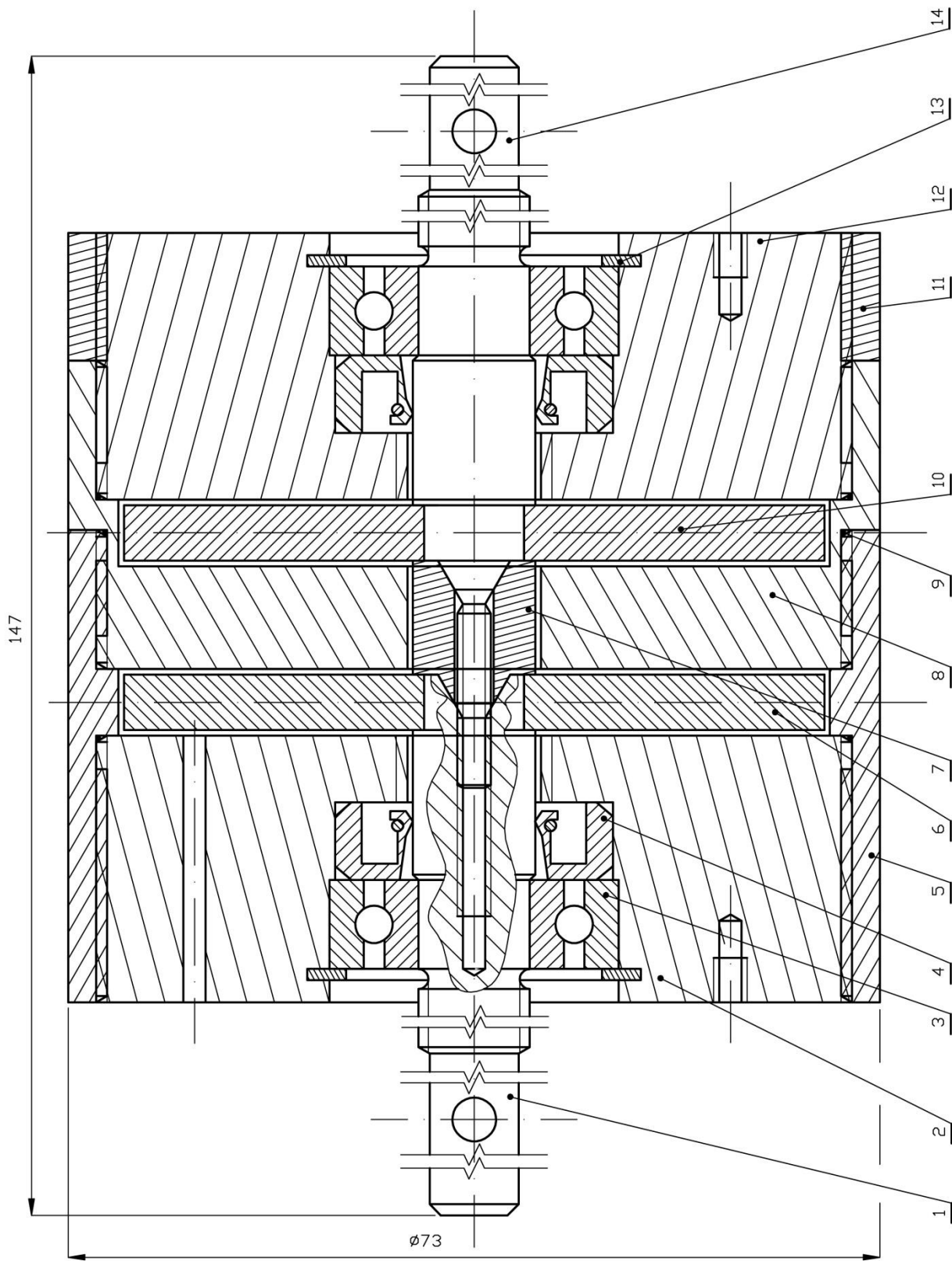


NAPOMENA: Završnu obradu elemenata izvršiti u sklopu.

1	Drugo vratilo	C15E	1	3.00.000	—
2	Disk	C15E	1	1.00.000	—
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 2:1
			Datum	09.04.2014.	Naziv: Sklop drugi rotor
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		12.01.000
					List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za
					L



						Razmera: 2:1	
			Datum	09.04.2014.	Naziv:		
			Obrad.	A. Poznić	<h1>Sklop jedan disk</h1>		
			Stand.				
			Odob.	A. Poznić			
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad			13.01.000	
						List:1/2	
						L	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za		



						Razmera: 2:1		
			Datum	09.04.2014.	Naziv:	Sklop dva diska		
			Obrad.	A. Poznić				
			Stand.					
			Odob.	A. Poznić				
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad			14.01.000		List:1/2
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za		

10.2. Tehnička dokumentacija prototipa 1 i prototipa 2

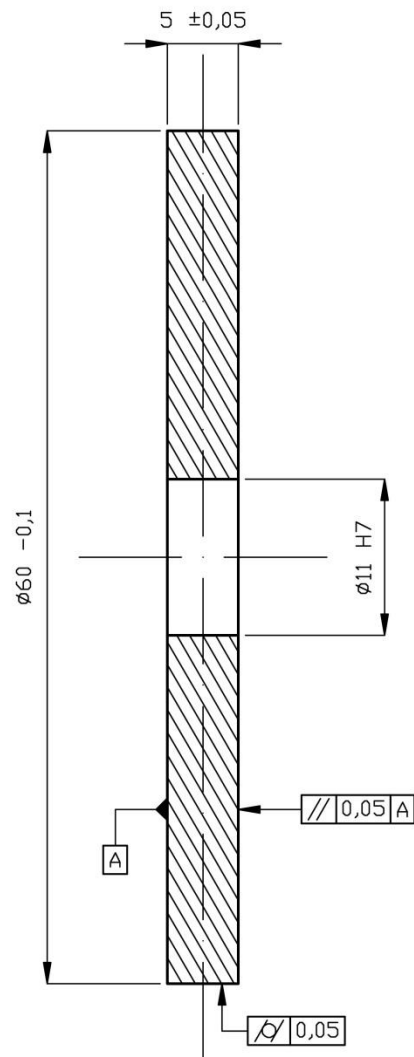
Ova stranica je namerno ostavljena prazna

∅9 H7

+0,015

-0,0

N7 Tokareno fino



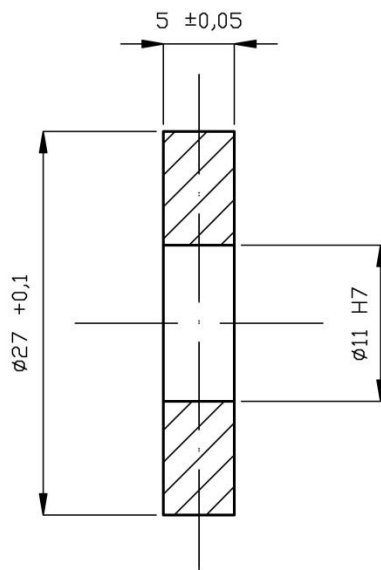
				Materijal: C15E	Razmera: 2:1
				Datum: 27.04.2015.	Naziv: Disk
				Obrad. A. Poznić	
				Stand.	
				Odob. A. Poznić	
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad	1.00.000
					List: 1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

∅9 H7

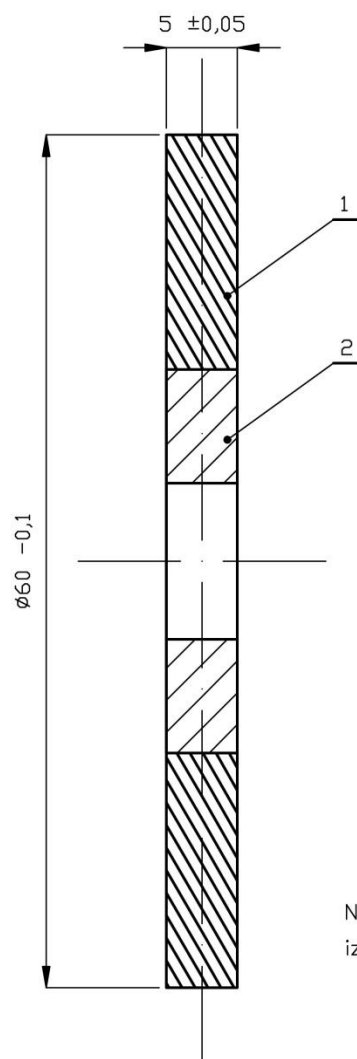
+0,015

-0,0

N7 Tokareno fino



				Materijal: AlMgSi0.5	Razmera: 2:1	
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Aluminijumsko središte diska	
			Obrad.	A. Poznić		
			Stand.			
			Odob.	A. Poznić		
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		2.00.000	List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za	L

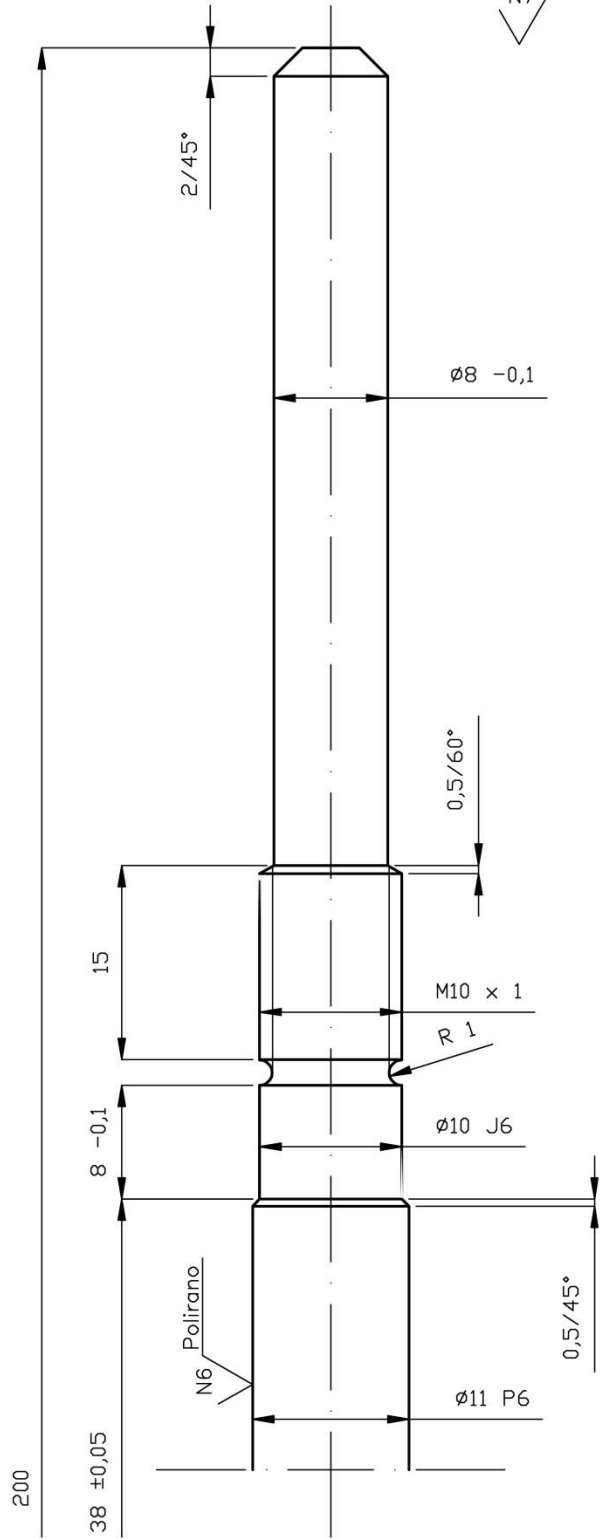


NAPOMENA: Završnu obradu oba elementa izvršiti u sklopu.

1	Disk	C15E	1	1.00.000	-
2	Aluminijumski središte diska	AlMgSi0.5	1	2.00.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 2:1
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Sklop – disk
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		3.01.000
					List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

Ø10 J6	+0,007
	-0,002
Ø11 P6	+0,024
	-0,015

N7 Tokareno fino / N6 Polirano

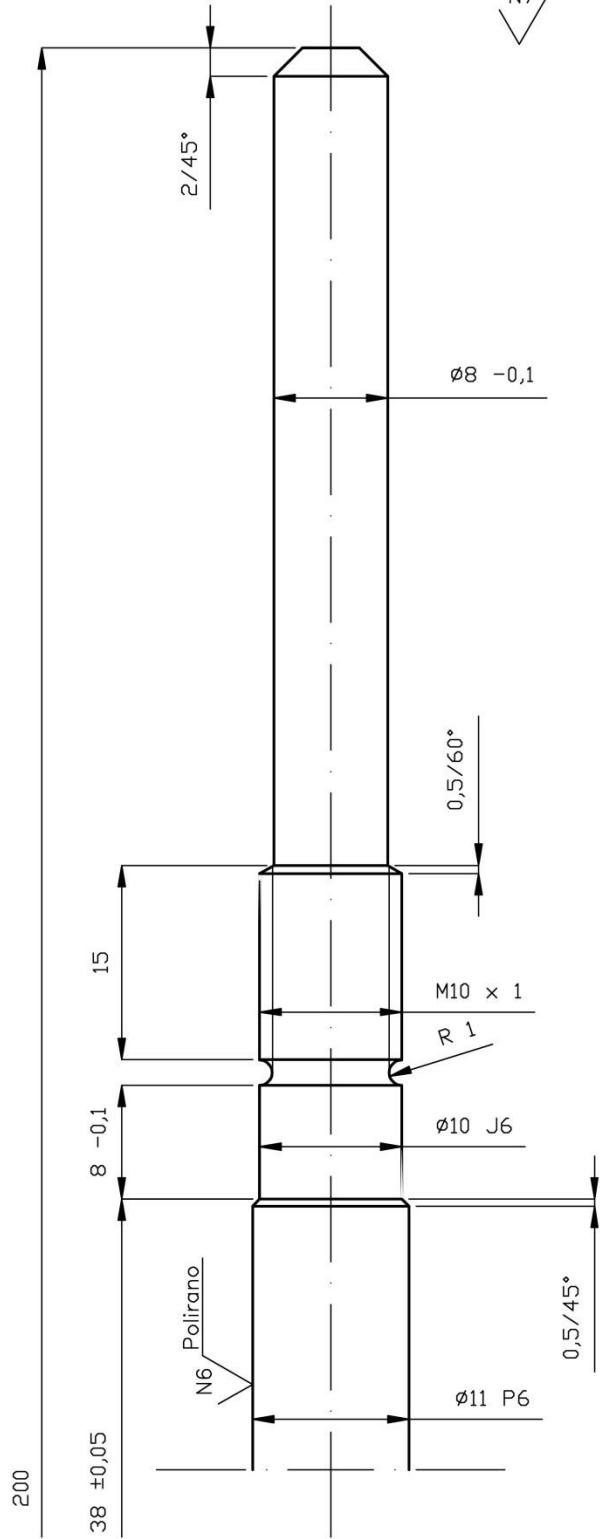


				Materijal: C15E	Razmera: 2:1
				Datum: 27.04.2015.	Naziv: Vratilo – čelik
				Obrad. A. Poznić	
				Stand.	
				Odob. A. Poznić	
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad	4.00.000
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

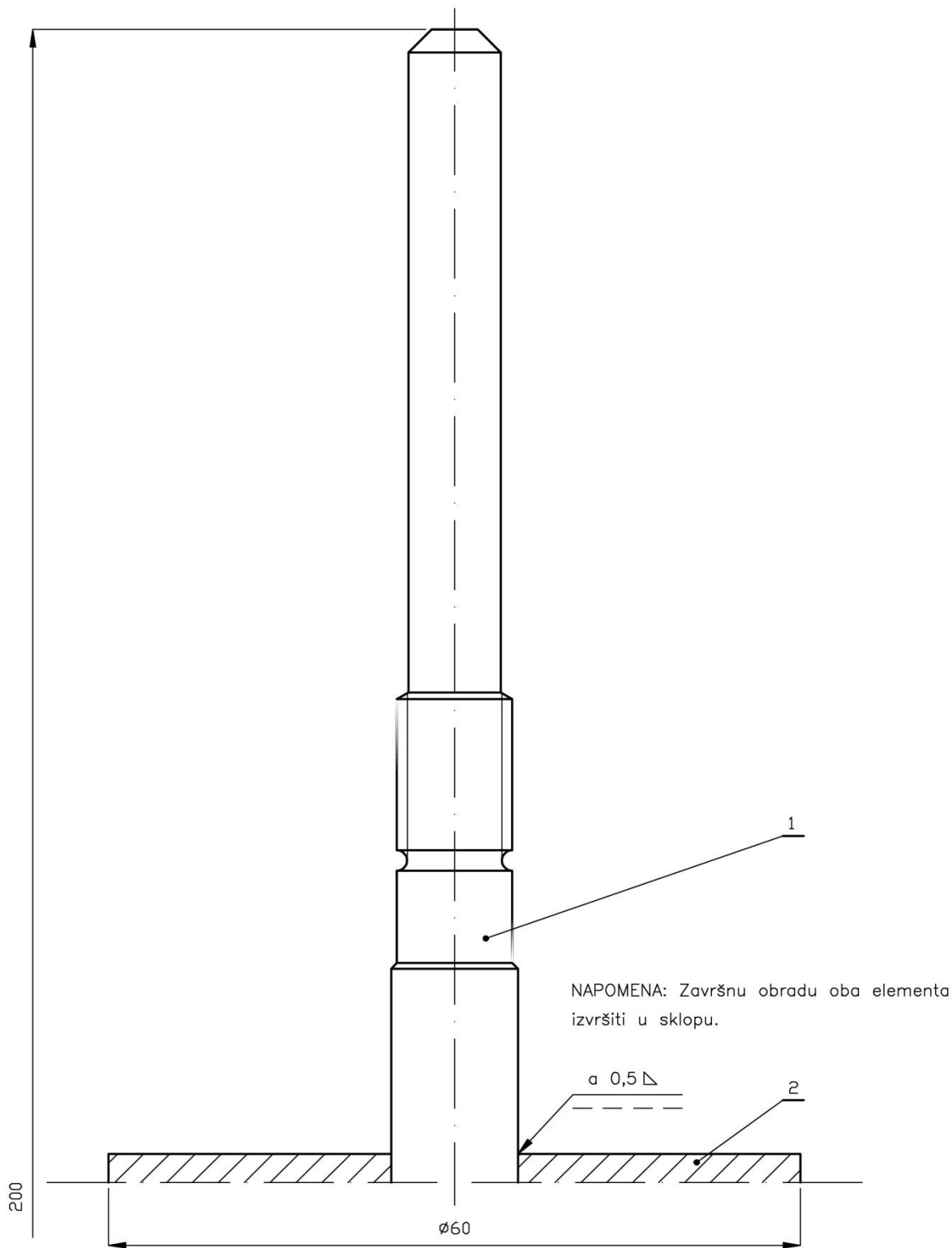
List:1/1

Ø10 J6	+0,007
	-0,002
Ø11 P6	+0,024
	-0,015

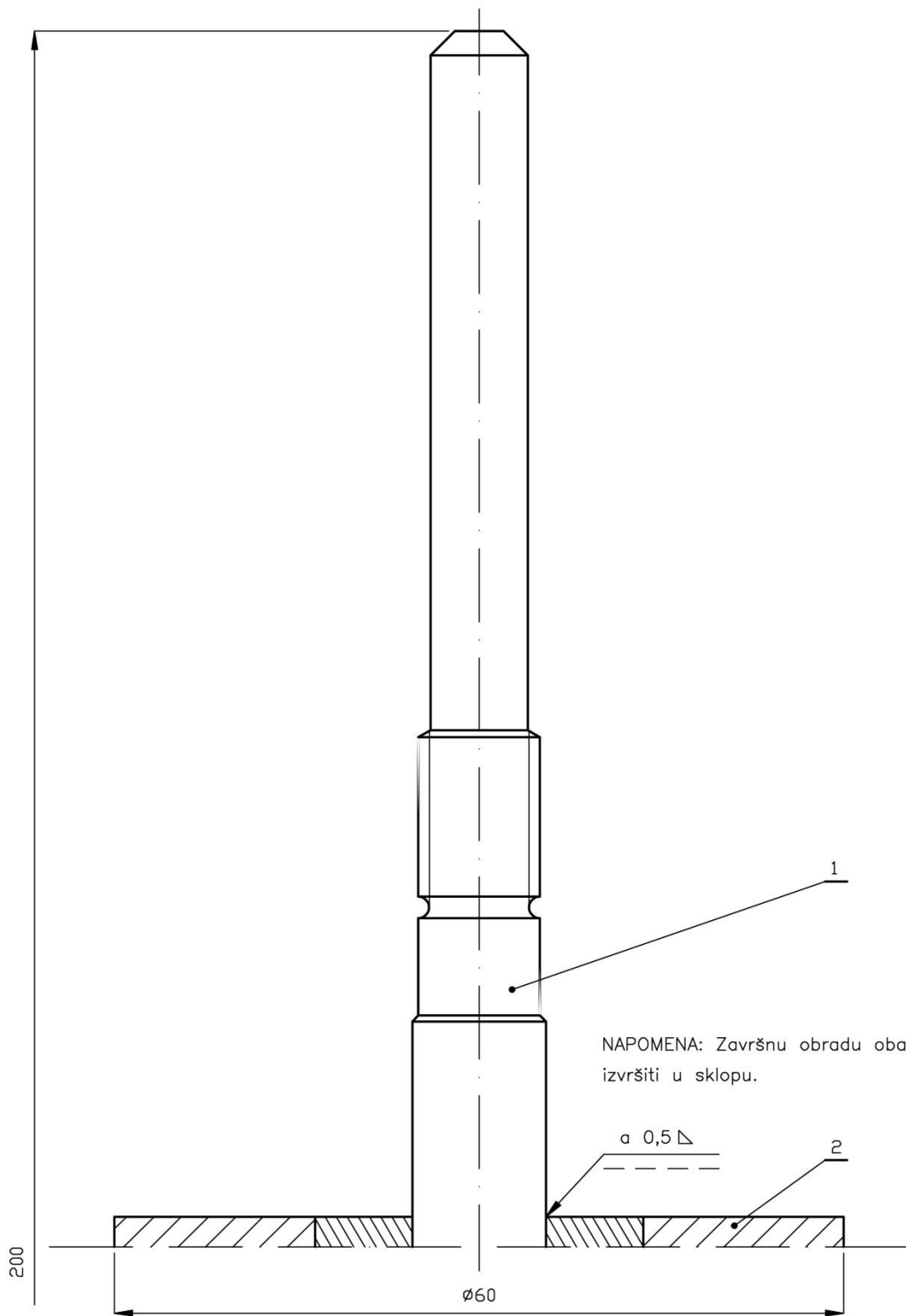
N7 Tokareno fino / N6 Polirano



				Materijal: AlMgSi0.5	Razmera: 2:1
Datum: 27.04.2015.				Naziv: Vratilo – aluminijum	
Obrad. A. Poznić					
Stand.					
Odob. A. Poznić					
Fakultet tehničkih nauka Novi Sad				5.00.000	List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

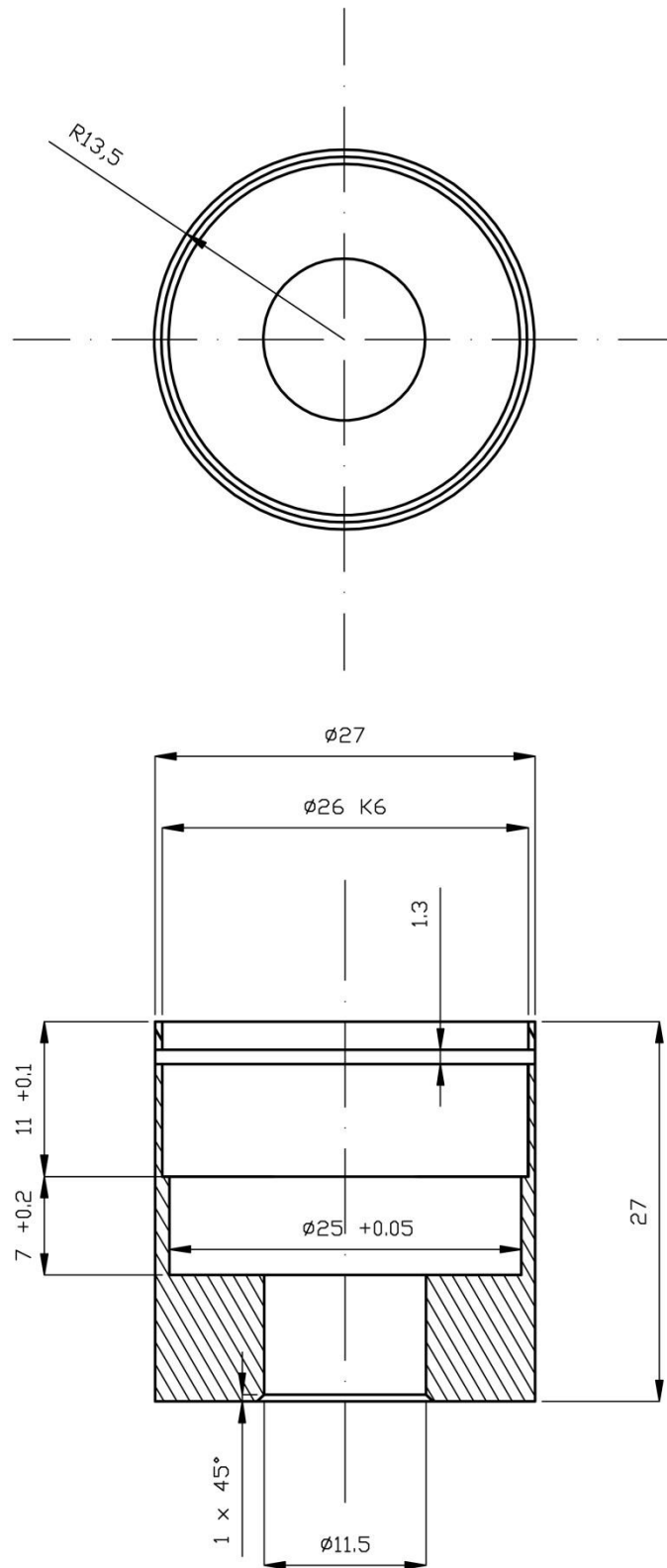


1	Vratilo	C15E	1	2.00.000	-
2	Disk	C15E	1	1.00.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 2:1
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Sklop vratilo čelik – disk
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		6.01.000
					List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za



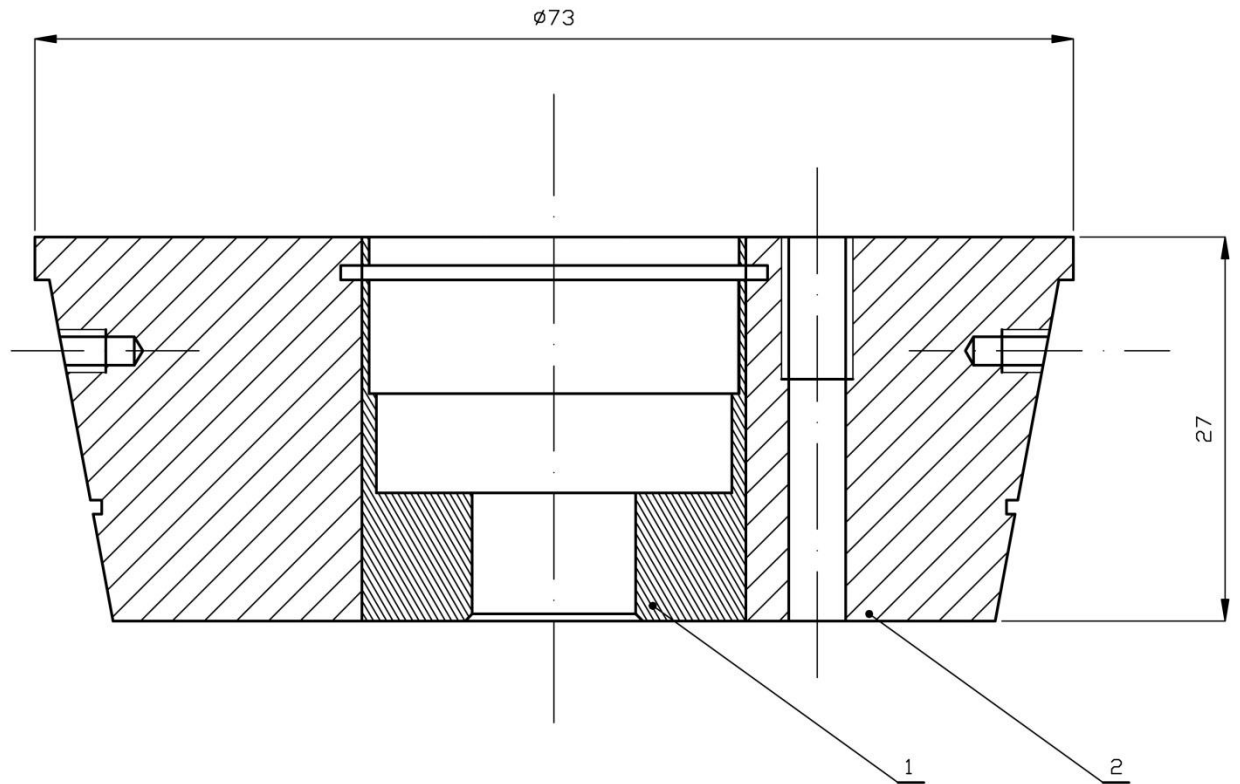
1	Vratilo	AlMgSi0.5	1	5.00.000	-
2	Sklop – disk		1	3.01.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 2:1
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Sklop vratilo alum. – disk sa alum. središt.
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		7.01.000
					List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

N7 Tokareno fino



				Materijal: AlMgSi0.5	Razmera: 2:1
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Aluminijumsko središte statora
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		9.00.000
					List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

N7 Tokareno fino

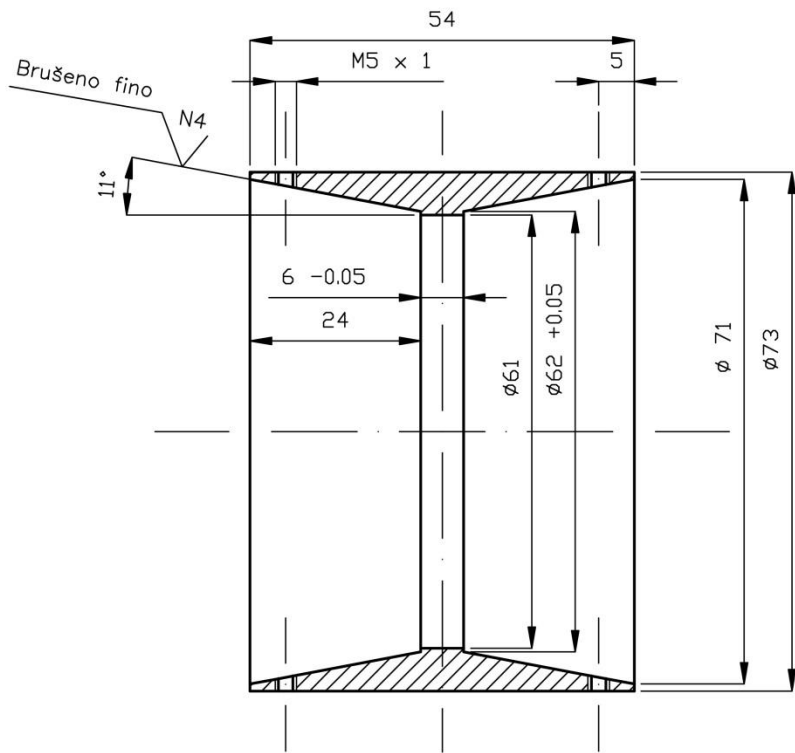


NAPOMENA: Završnu obradu oba elementa izvršiti u sklopu.

1	Aluminijumsko središte statora	AlMgSi0.5	1	9.00.000	-
2	Stator	C15E	1	8.00.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
				Materijal:	Razmera: 2:1
				Datum	27.04.2015.
				Obrad.	A. Poznić
				Stand.	
				Odob.	A. Poznić
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za
				L	

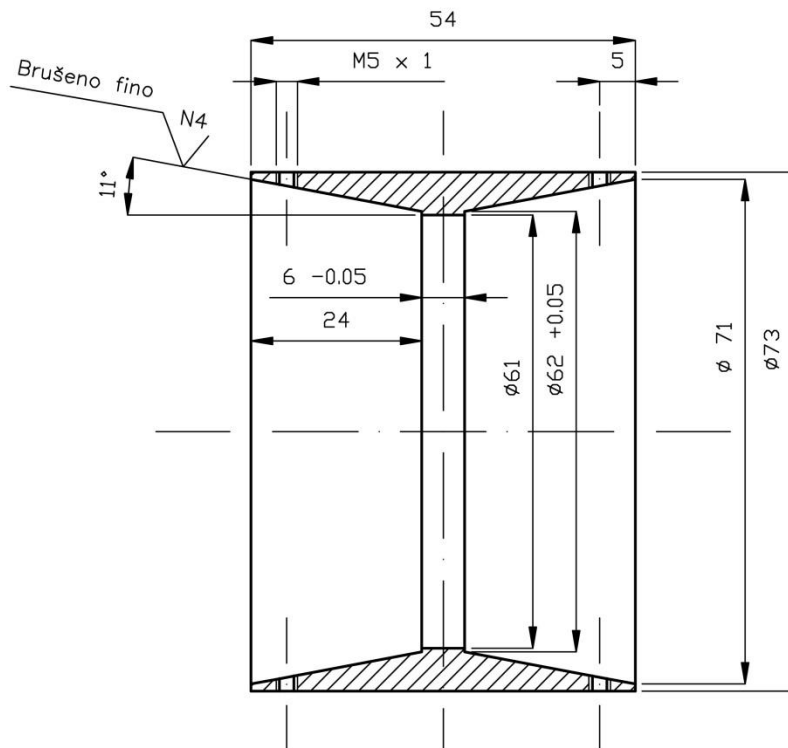
Naziv:
Sklop
stator – alu. središte

N7 Tokareno fino N4 Brušeno fino

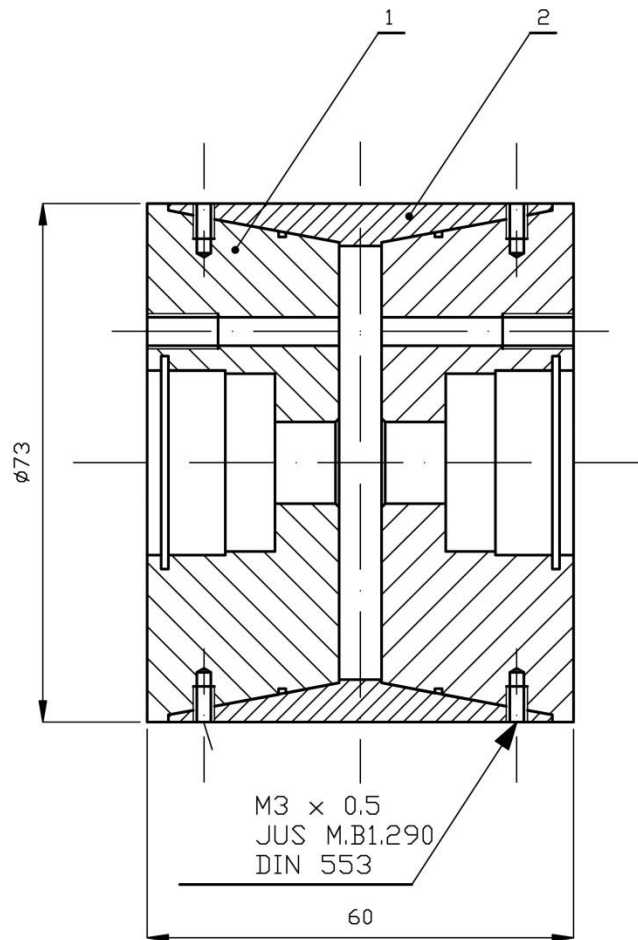


				Materijal: AlMgSi0.5		Razmera: 1:1	
				Datum: 27.04.2015.		Naziv: Aluminijumska čaura	
				Obrad. A. Poznić			
				Stand.			
				Odob. A. Poznić			
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		11.00.000	
						List: 1/1	
						L	
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	

N7 Tokareno fino N4 Brušeno fino

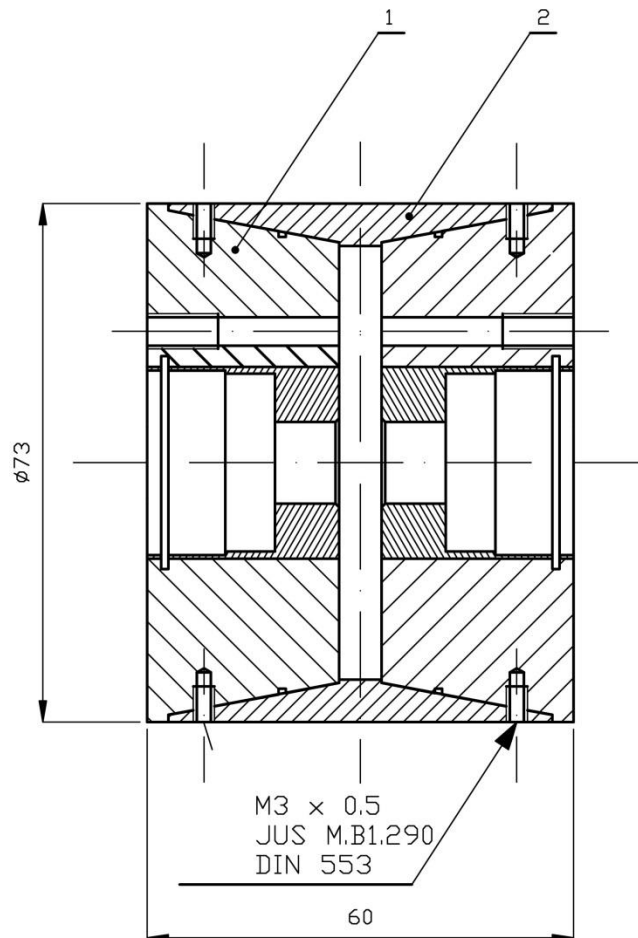


				Datum		27.04.2015.		Materijal: C15E		Razmera: 1:1	
				Obrad.		A. Poznić		Naziv: Čelična čaura			
				Stand.							
				Odob.		A. Poznić					
				Fakultet tehničkih nauka Novi Sad							
St.i		Izmene		Datum		Ime		Izvod pod.		Zamena za	
										L	



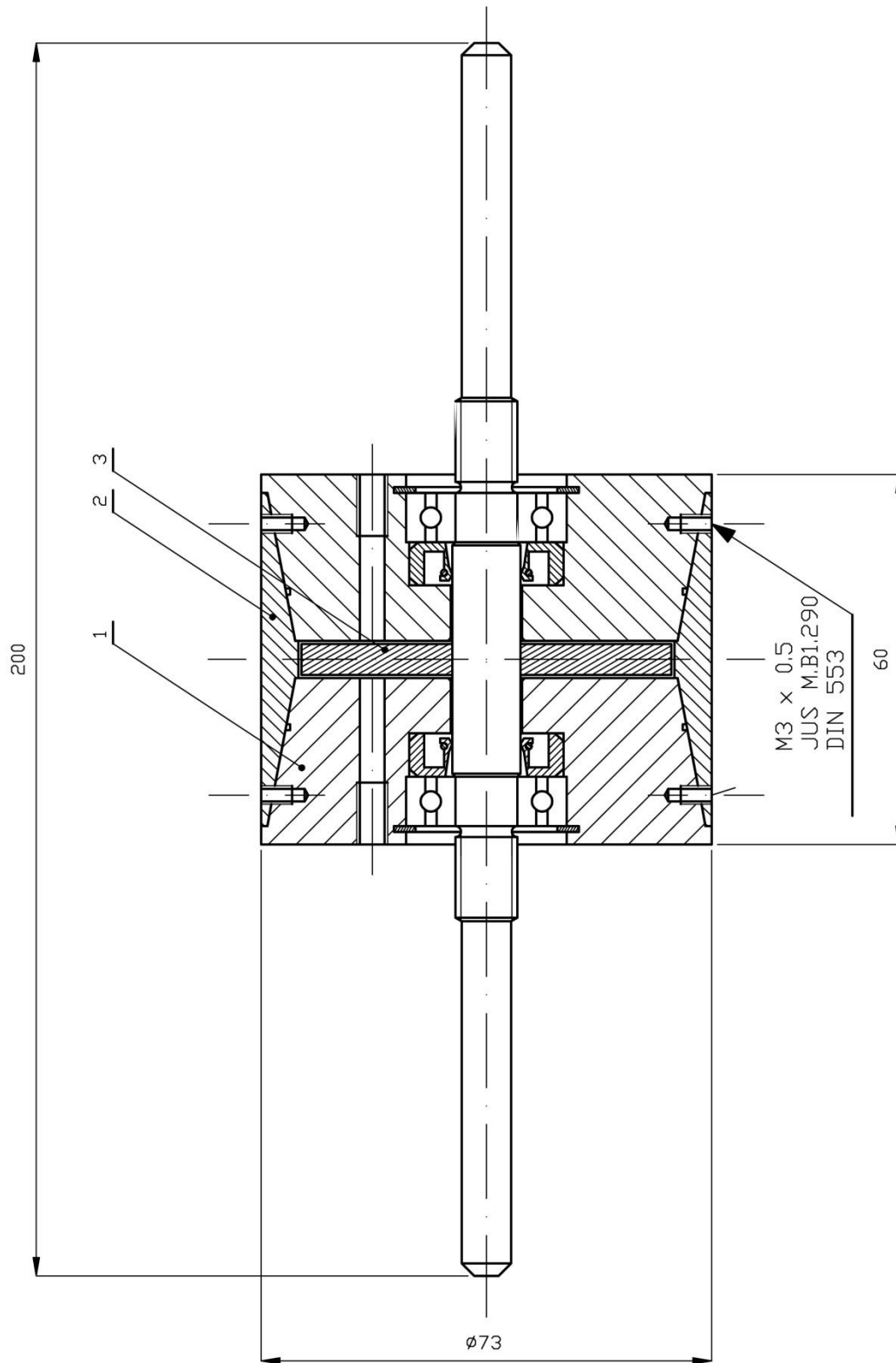
NAPOMENA: Bušenje otvora za vijke i završnu obradu elemenata izvršiti u sklopu.

1	Stator	C15E	2	8.00.000	-
2	Čelična čaura	C15E	1	12.00.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 1:1
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Sklop statori – čelična čaura
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		13.01.000
					List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za
					L



NAPOMENA: Bušenje otvora za vijke i završnu obradu elemenata izvršiti u sklopu.

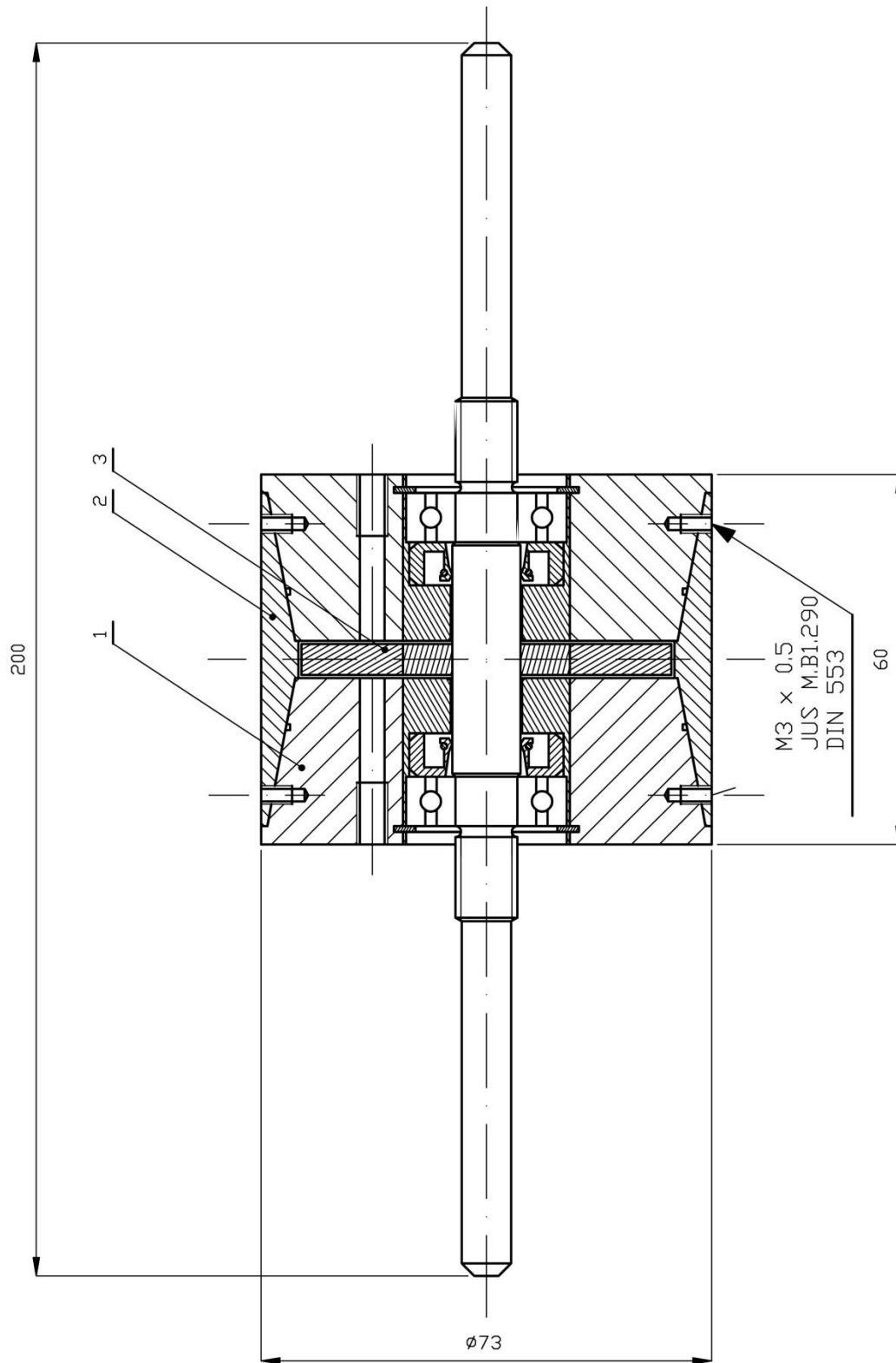
1	Sklop stator – alu. središte	C15E	2	10.01.000	–
2	Aluminijumska čaura	AlMgSi0.5	1	11.00.000	–
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
					Razmera: 1:1
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Sklop statori – alum. čaura
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		14.01.000
					List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za
					L



NAPOMENA: Bušenje otvora za vijke i završnu obradu elemenata izvršiti u sklopu.

						Razmera: 1:1	
			Datum	27.04.2015.	Naziv:		
			Obrad.	A. Poznić	Magnetoreološka kočnica – sklop čelik		
			Stand.				
			Odob.	A. Poznić	15.01.000		
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad				List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	
						L	

1	Stator	C15E	2	8.00.000	-
2	Čelična čaura	C15E	1	12.00.000	-
3	Sklop vratilo čelik – disk	C15E	1	6.01.000	-
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Magnetoreološka kočnica – sklop čelik
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		15.02.000
					List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za



NAPOMENA: Bušenje otvora za vijke i završnu obradu elemenata izvršiti u sklopu.

						Razmera: 1:1	
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Magnetoreološka kočnica – sklop alum.		
			Obrad.	A. Poznić			
			Stand.				
			Odob.	A. Poznić			
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		16.01.000		List:1/1
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.		Zamena za	
						L	

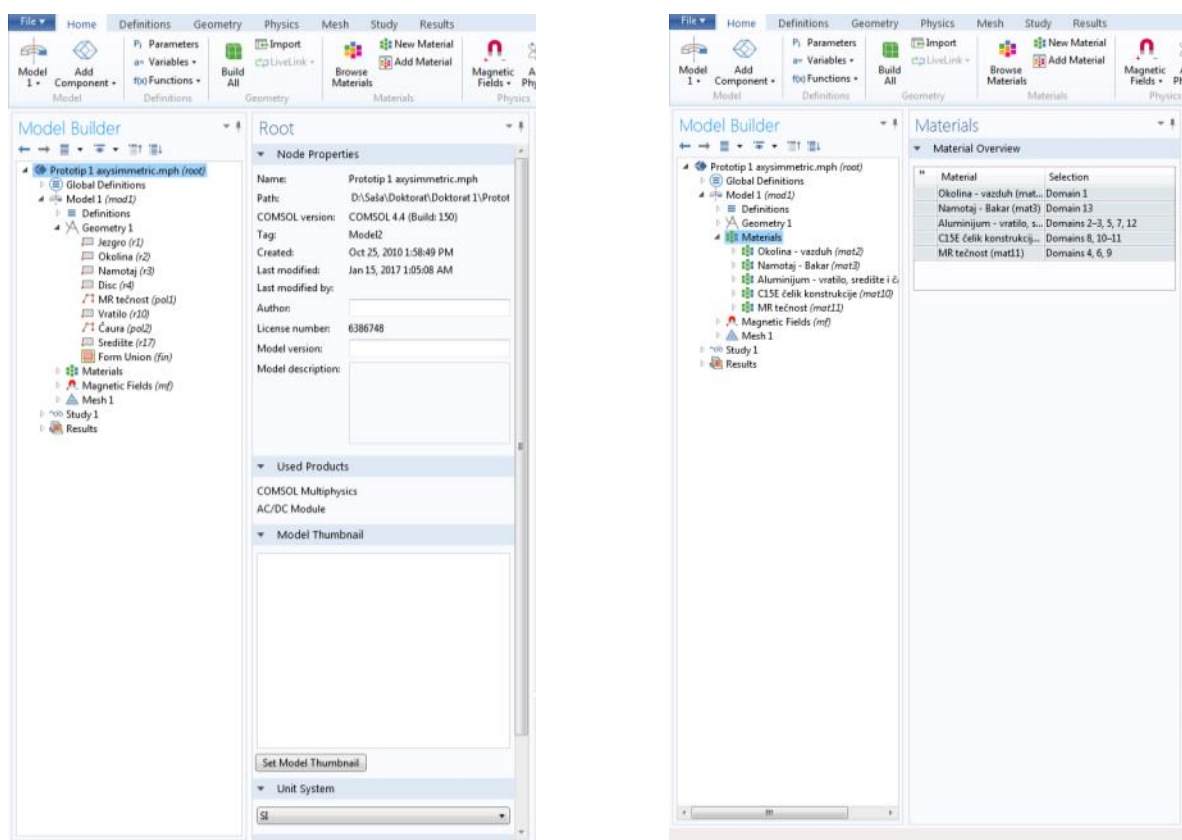
1	Sklop stator–alumin. središte		2	10.01.000	–
2	Aluminijumska čaura	AlMgSi0.5	1	11.00.000	–
3	Sklop vratilo al. disk sa al. sr.		1	7.01.000	–
Poz.	Naziv dela	Materijal	Kom.	Br. crteža	Napomena
			Datum	27.04.2015.	Naziv: Magnetoreološka kočnica – sklop alum.
			Obrad.	A. Poznić	
			Stand.		
			Odob.	A. Poznić	
			Fakultet tehničkih nauka Novi Sad		
				16.02.000	List:1/1
					L
St.i	Izmene	Datum	Ime	Izvod pod.	Zamena za

Ova stranica je namerno ostavljena prazna

10.3. Formiranje modela u Comsol-u

U ovom delu rada prikazan je način formiranja 2D modela MR kočnice u programskom paketu *Comsol Multiphysics*. Postupak formiranja modela sastojao se iz definisanja parametara, geometrije, materijala, magnetskih relacija, mreže i prikaz parametara od interesa. Pošto oba prototipa imaju vrlo sličnu konstrukciju, prvo je formiran i obrađen prototipa 1. Po završetku ove simulacije, izmenjeni su pojedini parametri konstrukcije i formiran je model prototipa 2. Obavljene su iste simulacije a potom upoređeni dobijeni rezultati. U nastavku teksta, predstavljen je način formiranja modela prototipa 1.

Koriseći tehničku dokumentaciju, predstavljenu u potpoglavlju 10.2, formirana je geometrija modela MR kočnice i definisano okruženje, 10.1 a). Okruženje, u koje je smešten model, bilo je pravougaonog oblika i imalo je približno 10 puta veću zapreminu od zapremine geometrije samog modela MR kočnice. Parametri $B-H$ krive i kriva nelinearnog materijala C15E, definisanog u *Comsol*-u, predstavljeni su na slici 10.2.

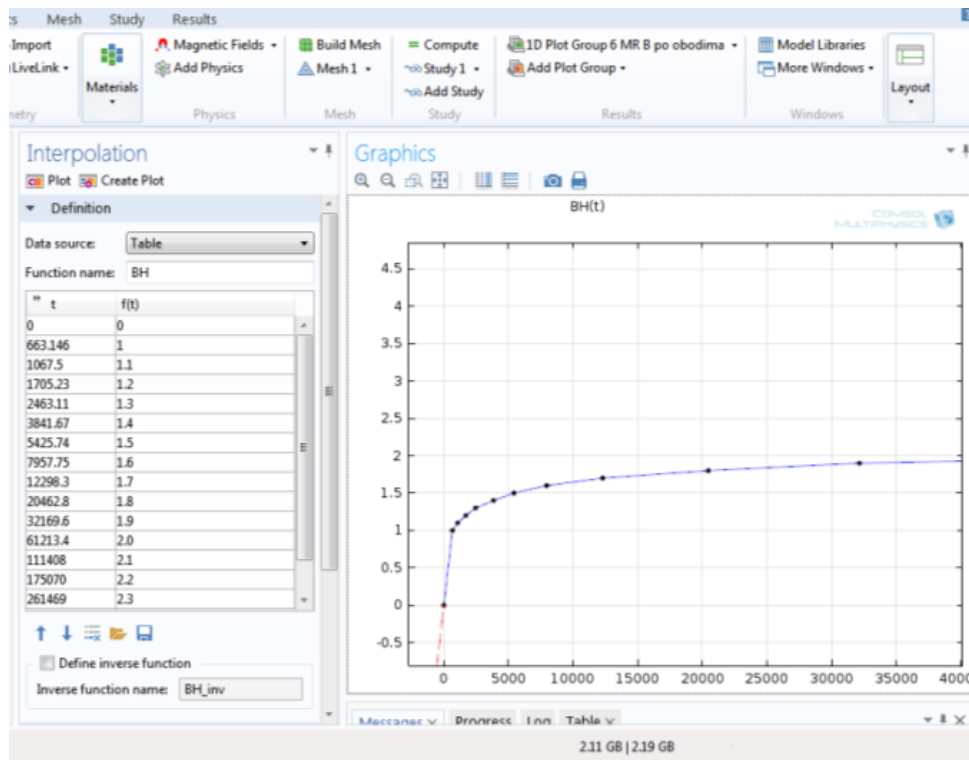


a)

b)

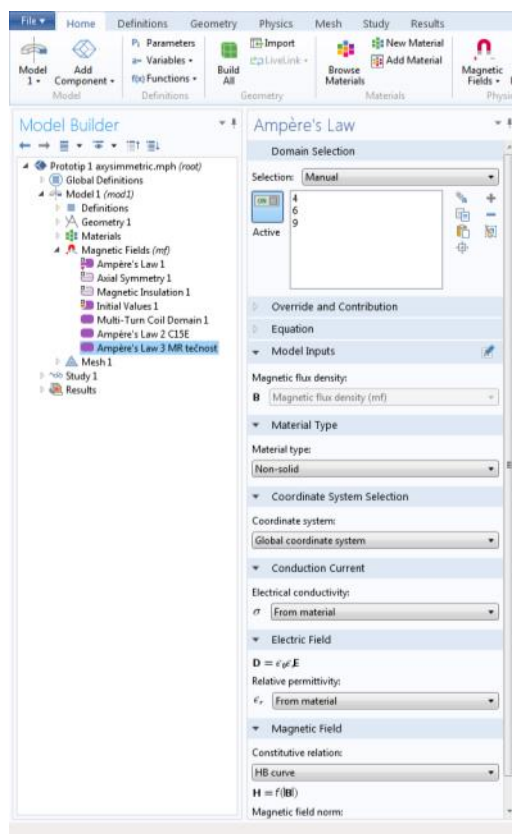
Slika 10.1. Osnovni parametri modela magnetoreološke kočnice

Po definisanju geometrije modela definisani su i dodeljeni materijali za svaki domen pojedinačno, odnosno za svaki element modela slika 10.1 b). Svakom elementu modela dodeljen odgovarajući materijal. Pojedini materijali su odabrani iz *Comsol*-ove biblioteke, vazduh i aluminijum, a nelinearni feromagnetski materijali, čelik i MR tečnost, su morali biti naknadno definisani. Feromagnetski materijali su definisani učitavanjem podataka o odnosu $B-H$ krive iz posebnog fajla, slika 10.2.



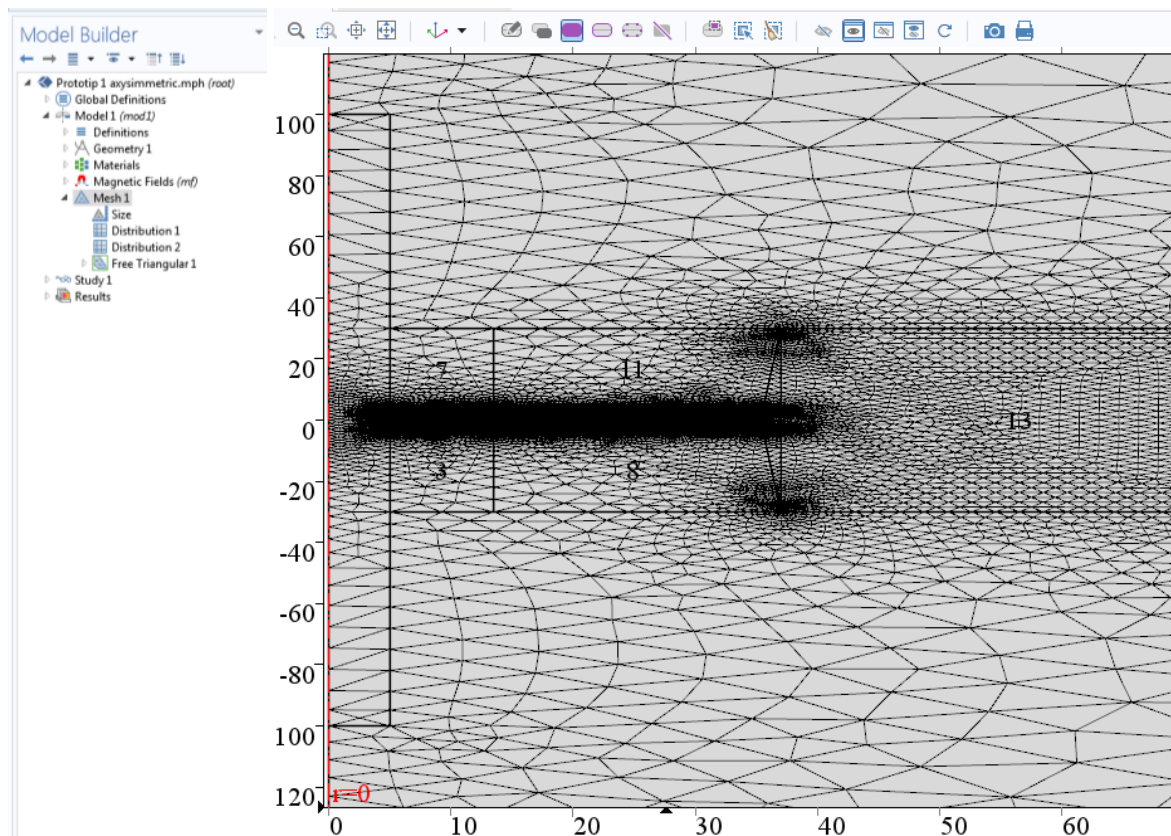
Slika 10.2. Tabelarni i grafički prikaz B-H krive novog nelinearnog materijala C15E

Za svaki element konstrukcije neophodno odabrati odgovarajuću jednačinu iz skupa jednačina za različite oblasti koje sadrži *Comsol*, ili definisati sopstvenu, a zatim definisati parametre koji figurišu u njoj. U posmatranom problemu definisane su tri *Ampere's Law* jednačine. Prva se odnosila na paramagnetske materijale, druga na čelik C15E a treća na MR tečnost, slika 10.3. Pored ovih, definisani su parametri namotaja - *Multi-Turn Coil*. Kao deo definicije problema javljaju se granični uslovi. *Comsol* nudi osnovne postavke - *Initial values* aksijalnu simetriju modela - *Axial Symmetry*, kao i uslove na rubu celokupne posmatrane oblasti - *Magnetic Insulation*.

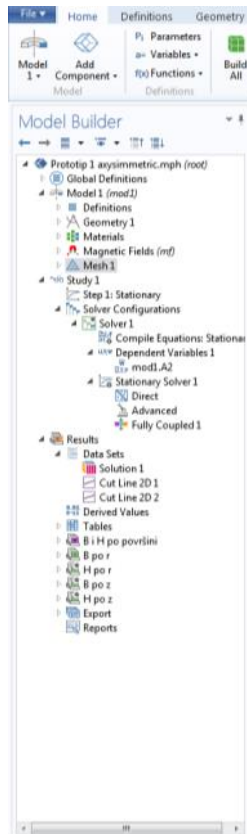


Slika 10.3. Izbor jednačina i konstitutivnih relacija

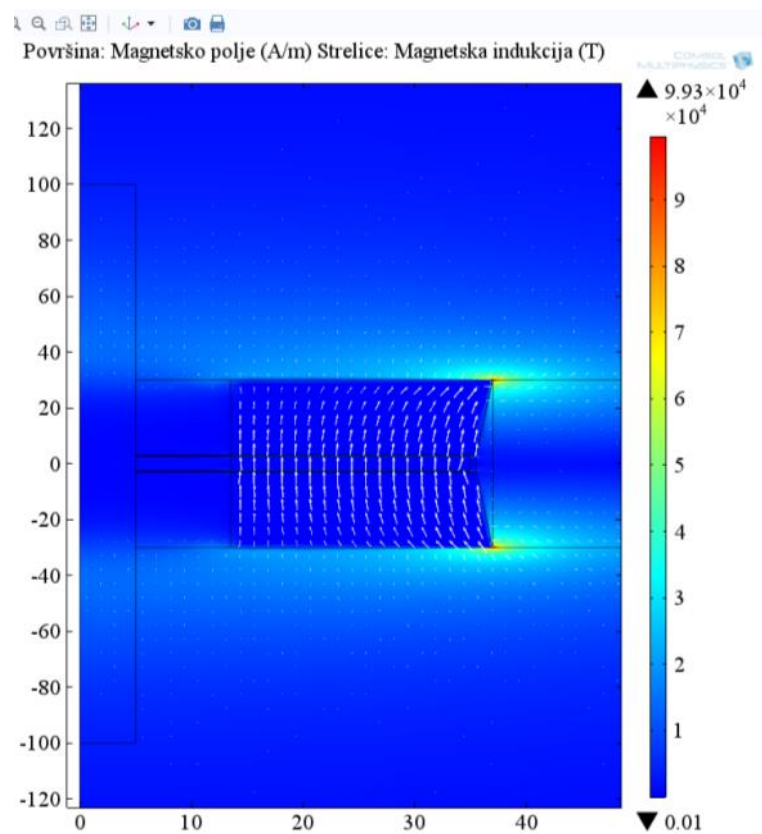
Definisanje mreže konačnih elemenata 2D modela u Comsolu izvršeno je pomoću elemenata trougaonog oblika. Broj konačnih elemenata određen je geometrijom modela. Ukoliko nije drugačije definisano Comsol sam definiše parametre mreže konačnih elemenata modela. Ukoliko postoji potreba za preciznijim definisanjem parametara mreže u određenoj oblasti modela, neophodno je dodati odgovarajuću opciju – *Free Triangular*. Parametre mreže moguće je kontrolisati kroz opciju *Size*. Zbog specifičnosti geometrije modela, oblasti od interesa, procepi sa MR tečnošću i čaura diskretizovani su gušćom mrežom konačnih elemenata – *Distribution 1* i *Distribution 2*, slika 10.5. Za rešavanje modela korišćena je standardna postavka Comsol-ovog *Solver*-a, slika 10.6. Rezultati simulacije su prvenstveno predstavljani u grafičkom obliku, slika 10.7. Posmatrane su vrednosti i raspodela H i B po predviđenim linijama u ravni preseka prototipa u *2D Plot Group* opciji. Odabirom odgovarajućeg seta boja i parametara dodatnih elementata modela, postiže se zadovoljavajući kontrast i prikaza pogodan za ilustraciju dobijenih rezultata. Numeričke vrednosti rezultata u tabelarnom obliku izvežene u odgovarajući fajl.



Slika 10.4. Mreža konačnih elemenata modela prototipa 1



Slika 10.6. Postavka Solver-a



Slika 10.7. Ilustracija raspodele magnetskog polja magnetske indukcije u ravni

10.4. Numeričke vrednosti rezultata pojedinih merenja

Ova stranica je namerno ostavljena prazna

Numeričke vrednosti rezultati merenja krive prvobitnog magnetisanja za uzorak C15E

Bal. Const. [Vs/mm]	N1	N2	L sred. [mm]	A [mm ²]	H [kA/m]	I [mA]	ℓ _{poč} [mm]	ℓ _{kr} [mm]	Suma_1 [mm]	B [T]	
4,34	600,00	60,00	100,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
					0,12	20,00				181,57	0,26
Parametri:	R _s =	1	[Ω]	2,5 x 20	0,28	46,89	-205,20	220,50	425,70	425,70	0,62
	R _{krit. Period.} =	49	[Ω]		0,30	50,00				448,72	0,65
	R _{sekundara} =	1	[Ω]		0,55	91,91	-213,80	119,40	333,20	758,90	1,10
	R _s =	11	[Ω]		0,60	100,00				785,18	1,14
	U _{izvora} =	10	[V]		0,81	135,35	-214,00	-72,90	141,10	900,00	1,30
	Batrerija otpornika u kutiji=	200	[Ω]		0,90	150,00				927,97	1,34
					1,06	177,41	-207,40	-127,10	80,30	980,30	1,42
					1,20	200,00				1010,32	1,46
					1,31	218,12	-204,10	-150,00	54,10	1034,40	1,50
					1,50	250,00				1065,20	1,54
					1,55	257,55	-201,70	-163,60	38,10	1072,50	1,55
					1,77	295,62	-203,00	-173,80	29,20	1101,70	1,59
					1,80	300,00				1104,50	1,60
					1,99	332,48	-204,70	-181,10	23,60	1125,30	1,63
					2,10	350,00				1134,94	1,64
					2,21	368,10	-207,60	-188,00	19,60	1144,90	1,66
					2,40	400,00				1160,37	1,68
					2,41	402,33	-211,20	-194,60	16,60	1161,50	1,68
					2,61	434,22	-214,60	-200,40	14,20	1175,70	1,70
					2,70	450,00				1182,95	1,71
					2,77	461,00	-216,00	-203,70	12,30	1188,00	1,72

1,00

H [kA/m]	I [mA]	$\ell_{poč}$ [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]	H [kA/m]	I [mA]	$\ell_{poč}$ [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,12	20,00				185,60	0,27	0,12	20,00				183,38	0,27
0,28	46,93	-204,00	231,50	435,50	435,50	0,63	0,28	46,93	-210,50	219,80	430,30	430,30	0,62
0,30	50,00				458,07	0,66	0,30	50,00				452,97	0,66
0,55	92,11	-205,90	126,30	332,20	767,70	1,11	0,55	92,02	-214,50	118,40	332,90	763,20	1,10
0,60	100,00				792,62	1,15	0,60	100,00				788,65	1,14
0,81	135,81	-209,30	-71,30	138,00	905,70	1,31	0,81	135,63	-216,20	-77,10	139,10	902,30	1,31
0,90	150,00				931,74	1,35	0,90	150,00				929,25	1,34
1,07	178,21	-213,20	-135,40	77,80	983,50	1,42	1,07	177,92	-216,30	-137,00	79,30	981,60	1,42
1,20	200,00				1011,07	1,46	1,20	200,00				1009,88	1,46
1,32	219,38	-215,50	-163,40	52,10	1035,60	1,50	1,31	218,91	-213,90	-161,40	52,50	1034,10	1,50
1,50	250,00				1064,86	1,54	1,50	250,00				1065,07	1,54
1,56	259,35	-216,80	-178,60	38,20	1073,80	1,55	1,55	258,66	-213,00	-173,40	39,60	1073,70	1,55
1,79	298,13	-215,20	-185,50	29,70	1103,50	1,60	1,78	297,07	-209,30	-179,90	29,40	1103,10	1,60
1,80	300,00				1104,69	1,60	1,80	300,00				1104,99	1,60
2,01	335,83	-213,10	-189,10	24,00	1127,50	1,63	2,00	334,12	-206,70	-182,80	23,90	1127,00	1,63
2,10	350,00				1135,21	1,64	2,10	350,00				1135,77	1,64
2,23	372,39	-210,30	-190,40	19,90	1147,40	1,66	2,22	370,32	-205,00	-185,00	20,00	1147,00	1,66
2,40	400,00				1160,60	1,68	2,40	400,00				1161,15	1,68
2,45	407,95	-208,00	-191,00	17,00	1164,40	1,68	2,43	405,76	-203,10	-186,20	16,90	1163,90	1,68
2,65	442,12	-205,80	-191,00	14,80	1179,20	1,71	2,64	440,04	-203,40	-188,80	14,60	1178,50	1,70
2,70	450,00				1182,19	1,71	2,70	450,00				1182,08	1,71
2,86	476,37	-204,00	-191,00	13,00	1192,20	1,72	2,84	473,43	-205,70	-193,70	12,00	1190,50	1,72

2,00

3,00

H [kA/m]	I [mA]	ℓ _{poč} [mm]	ℓ _{kr} [mm]	Suma_1 [mm]	B [T]	H [kA/m]	I [mA]	ℓ _{poč} [mm]	ℓ _{kr} [mm]	Suma_1 [mm]	B [T]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,12	20,00			195,12	0,28	0,12	20,00			186,60	0,27
0,28	46,70	-226,90	228,70	455,60	0,66	0,28	46,88	-218,50	218,90	437,40	0,63
0,30	50,00			480,24	0,69	0,30	50,00			460,61	0,67
0,55	91,25	-218,00	114,60	332,60	1,14	0,55	91,94	-217,80	117,40	335,20	1,12
0,60	100,00			817,88	1,18	0,60	100,00			798,63	1,16
0,79	132,05	-218,00	-79,60	138,40	1,34	0,81	135,51	-215,40	-74,70	140,70	1,32
0,90	150,00			963,09	1,39	0,90	150,00			940,74	1,36
1,00	166,68	-216,30	-145,90	70,40	1,44	1,07	177,76	-212,90	-132,90	80,00	1,44
1,20	200,00			1037,41	1,50	1,20	200,00			1022,16	1,48
1,25	209,14	-214,30	-162,80	51,50	1,52	1,31	218,75	-210,10	-156,90	53,20	1,51
1,47	245,71	-210,50	-171,90	38,60	1,57	1,50	250,00			1077,10	1,56
1,50	250,00			1090,14	1,58	1,55	258,48	-207,70	-168,80	38,90	1,57
1,69	281,70	-207,90	-182,40	25,50	1,61	1,78	297,01	-205,10	-175,40	29,70	1,61
1,80	300,00			1124,67	1,63	1,80	300,00			1117,02	1,62
1,90	316,28	-205,00	-182,20	22,80	1,64	2,01	334,26	-203,00	-179,10	23,90	1,65
2,09	348,61	-203,50	-186,80	16,70	1,67	2,10	350,00			1145,44	1,66
2,10	350,00			1152,80	1,67	2,22	370,68	-202,90	-188,00	14,90	1,67
2,28	379,86	-204,00	-188,30	15,70	1,69	2,40	400,00			1168,05	1,69
2,40	400,00			1176,85	1,70	2,44	405,91	-204,00	-187,00	17,00	1,69
2,47	411,69	-205,70	-191,40	14,30	1,71	2,64	440,21	-206,00	-191,50	14,50	1,71
2,65	441,02	-207,90	-195,10	12,80	1,73	2,70	450,00			1189,27	1,72
2,70	450,00			1219,23	1,76	2,84	472,83	-208,60	-195,70	12,90	1,73

4,00

5,00

H [kA/m]	I [mA]	ℓ_{poč} [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]	Isr.	Suma sr	Hsr	Bsr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,12	20,00				190,15	0,28	20,00	187,07	0,12	0,27
0,28	46,72	-216,70	227,50	444,20	444,20	0,64	46,84	438,12	0,28	0,63
0,30	50,00				468,83	0,68	50,00	461,57	0,30	0,67
0,55	91,28	-216,70	117,90	334,60	778,80	1,13	91,75	771,57	0,55	1,12
0,60	100,00				807,04	1,17	100,00	798,33	0,60	1,15
0,80	133,99	-215,00	-76,70	138,30	917,10	1,33	134,72	910,83	0,81	1,32
0,90	150,00				947,71	1,37	150,00	940,08	0,90	1,36
1,05	174,73	-212,90	-135,00	77,90	995,00	1,44	175,45	988,45	1,05	1,43
1,20	200,00				1030,42	1,49	200,00	1020,21	1,20	1,48
1,26	209,26	-210,60	-162,20	48,40	1043,40	1,51	215,59	1040,42	1,29	1,51
1,48	246,60	-208,50	-171,90	36,60	1080,00	1,56	248,72	1073,22	1,49	1,55
1,50	250,00				1082,78	1,57	255,67	1079,72	1,53	1,56
1,69	282,08	-206,10	-177,10	29,00	1109,00	1,60	291,94	1107,50	1,75	1,60
1,80	300,00				1120,29	1,62	300,00	1112,69	1,80	1,61
1,92	319,69	-204,20	-180,50	23,70	1132,70	1,64	328,78	1131,15	1,97	1,64
2,10	350,00				1149,24	1,66	349,77	1142,12	2,10	1,65
2,14	356,33	-203,10	-183,10	20,00	1152,70	1,67	364,64	1149,78	2,19	1,66
2,29	381,75	-203,00	-186,90	16,10	1168,80	1,69	393,60	1164,46	2,36	1,68
2,40	400,00				1175,06	1,70	403,66	1168,77	2,42	1,69
2,52	420,21	-205,20	-192,00	13,20	1182,00	1,71	431,42	1180,48	2,59	1,71
2,70	450,00				1192,56	1,73	448,50	1187,33	2,69	1,72
2,71	451,23	-207,90	-196,90	11,00	1193,00	1,73	464,14	1196,87	2,78	1,73

6,00

Numeričke vrednosti rezultati merenja krive prvobitnog magnetisanja za uzorak 11SMn30

Bal. Const. [Vs/mm]	N1	N2	L sred. [mm]	A [mm ²]	H [kA/m]	I [mA]	ℓ _{poč} [mm]	ℓ _{kr} [mm]	Suma_1 [mm]	B [T]	
3,98	600,00	60,00	100,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Parametri:	R _š =	1	[Ω]	2,5 x 20	0,28	47,07	-215,00	212,70	427,70	427,70	0,57
	R _{krit. Period.} =	49	[Ω]		0,30	50,00				452,69	0,60
	R _{sekundara} =	0	[Ω]		0,55	92,40	-216,60	170,00	386,60	814,30	1,08
	R _s =	10	[Ω]		0,60	100,00				842,34	1,12
	U _{izvora} =	10	[V]		0,82	136,31	-216,30	-54,30	162,00	976,30	1,30
	Batrerija otpornika u kutiji=	200	[Ω]		0,90	150,00				1005,77	1,33
					1,07	178,95	-214,20	-122,40	91,80	1068,10	1,42
					1,20	200,00				1098,72	1,46
					1,32	219,79	-211,20	-151,80	59,40	1127,50	1,50
					1,50	250,00				1158,77	1,54
					1,56	260,56	-208,90	-166,70	42,20	1169,70	1,55
					1,80	299,62	-205,90	-175,00	30,90	1200,60	1,59
					1,80	300,00				1200,84	1,59
					2,03	337,61	-203,90	-179,80	24,10	1224,70	1,62
					2,10	350,00				1231,22	1,63
					2,25	374,50	-202,50	-183,10	19,40	1244,10	1,65
					2,40	400,00				1248,65	1,66
					2,46	410,40	-203,30	-196,90	6,40	1250,50	1,66
					2,67	445,40	-204,80	-190,70	14,10	1264,60	1,68
					2,70	450,00				1266,26	1,68
					2,88	479,58	-207,20	-194,90	12,30	1276,90	1,69

H [kA/m]	I [mA]	$\ell_{poč}$ [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	47,06	-213,90	207,20	421,10	421,10	0,56
0,30	50,00				446,51	0,59
0,55	92,41	-213,00	179,00	392,00	813,10	1,08
0,60	100,00				841,51	1,12
0,82	136,33	-210,00	-45,60	164,40	977,50	1,30
0,90	150,00				1007,22	1,34
1,07	178,97	-207,20	-114,50	92,70	1070,20	1,42
1,20	200,00				1100,79	1,46
1,32	220,42	-204,50	-144,20	60,30	1130,50	1,50
1,50	250,00				1161,51	1,54
1,56	260,67	-202,20	-160,00	42,20	1172,70	1,56
1,80	299,75	-199,70	-168,70	31,00	1203,70	1,60
1,80	300,00				1203,86	1,60
2,03	337,78	-197,70	-173,50	24,20	1227,90	1,63
2,10	350,00				1234,39	1,64
2,25	374,69	-198,50	-178,90	19,60	1247,50	1,66
2,40	400,00				1259,14	1,67
2,46	410,57	-199,60	-183,10	16,50	1264,00	1,68
2,67	445,59	-201,70	-187,90	13,80	1277,80	1,70
2,70	450,00				1279,35	1,70
2,88	479,80	-203,90	-191,90	12,00	1289,80	1,71

2

H [kA/m]	I [mA]	$\ell_{poč}$ [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	47,07	-212,20	211,40	423,60	423,60	0,56
0,30	50,00				448,78	0,60
0,55	92,42	-212,20	177,50	389,70	813,30	1,08
0,60	100,00				841,42	1,12
0,82	136,33	-211,10	-48,20	162,90	976,20	1,30
0,90	150,00				1005,77	1,33
1,07	179,00	-209,00	-116,70	92,30	1068,50	1,42
1,20	200,00				1098,86	1,46
1,32	220,43	-206,20	-146,30	59,90	1128,40	1,50
1,50	250,00				1159,35	1,54
1,56	260,46	-203,80	-161,90	41,90	1170,30	1,55
1,80	299,80	-201,30	-170,30	31,00	1201,30	1,59
1,80	300,00				1201,43	1,59
2,03	337,86	-199,50	-175,10	24,40	1225,70	1,63
2,10	350,00				1232,17	1,63
2,25	374,80	-197,90	-178,20	19,70	1245,40	1,65
2,40	400,00				1256,82	1,67
2,46	410,76	-197,60	-181,30	16,30	1261,70	1,67
2,68	446,80	-198,80	-184,70	14,10	1275,80	1,69
2,70	450,00				1276,03	1,69
2,88	480,04	-200,70	-198,30	2,40	1278,20	1,70

3

H [kA/m]	I [mA]	$\ell_{poč}$ [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	47,06	-211,20	203,80	415,00	415,00	0,55
0,30	50,00				440,21	0,58
0,55	92,40	-211,80	177,00	388,80	803,80	1,07
0,60	100,00				831,83	1,10
0,82	136,32	-211,30	-49,30	162,00	965,80	1,28
0,90	150,00				995,41	1,32
1,07	178,97	-209,00	-116,70	92,30	1058,10	1,40
1,20	200,00				1087,87	1,44
1,32	220,43	-206,70	-148,00	58,70	1116,80	1,48
1,50	250,00				1146,99	1,52
1,56	260,69	-204,20	-163,10	41,10	1157,90	1,54
1,80	299,81	-201,30	-171,20	30,10	1188,00	1,58
1,80	300,00				1188,12	1,58
2,03	337,85	-199,30	-175,80	23,50	1211,50	1,61
2,10	350,00				1217,75	1,62
2,25	374,80	-197,10	-178,10	19,00	1230,50	1,63
2,40	400,00				1241,71	1,65
2,46	410,76	-197,10	-181,10	16,00	1246,50	1,65
2,68	445,84	-198,00	-184,20	13,80	1260,30	1,67
2,70	450,00				1261,77	1,67
2,88	480,11	-199,90	-187,80	12,10	1272,40	1,69

4

H [kA/m]	I [mA]	$\ell_{poč}$ [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	47,06	-208,90	220,20	429,10	429,10	0,57
0,30	50,00				454,30	0,60
0,55	92,40	-210,40	178,30	388,70	817,80	1,08
0,60	100,00				845,98	1,12
0,82	136,30	-210,10	-47,30	162,80	980,60	1,30
0,90	150,00				1010,21	1,34
1,07	178,96	-207,80	-115,60	92,20	1072,80	1,42
1,20	200,00				1103,24	1,46
1,32	220,43	-205,80	-145,80	60,00	1132,80	1,50
1,50	250,00				1163,57	1,54
1,56	260,70	-203,60	-161,70	41,90	1174,70	1,56
1,80	299,57	-201,30	-170,20	31,10	1205,80	1,60
1,80	300,00				1206,07	1,60
2,03	337,82	-199,30	-175,10	24,20	1230,00	1,63
2,10	350,00				1236,52	1,64
2,25	374,80	-197,80	-178,00	19,80	1249,80	1,66
2,40	400,00				1261,36	1,67
2,46	410,78	-196,70	-180,20	16,50	1266,30	1,68
2,68	445,85	-196,70	-182,60	14,10	1280,40	1,70
2,70	450,00				1281,89	1,70
2,88	480,11	-198,50	-186,20	12,30	1292,70	1,71

5

H [kA/m]	I [mA]	ℓ_{poč} [mm]	ℓ_{kr} [mm]		Suma_1 [mm]	B [T]	Isr.	Suma sr	Hsr	Bsr
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	47,05	-208,90	212,20	421,10	421,10	0,56	47,06	422,93	0,28	0,56
0,30	50,00				446,28	0,59	50,00	448,13	0,30	0,59
0,55	92,36	-209,80	176,90	386,70	807,80	1,07	92,40	811,68	0,55	1,08
0,60	100,00				836,11	1,11	100,00	839,87	0,60	1,11
0,82	136,27	-210,80	-48,10	162,70	970,50	1,29	136,31	974,48	0,82	1,29
0,90	150,00				1000,24	1,33	150,00	1004,10	0,90	1,33
1,07	178,93	-210,70	-118,30	92,40	1062,90	1,41	178,96	1066,77	1,07	1,42
1,20	200,00				1093,49	1,45	200,00	1097,16	1,20	1,46
1,32	220,40	-208,70	-148,50	60,20	1123,10	1,49	220,32	1126,52	1,32	1,49
1,50	250,00				1154,13	1,53	250,00	1157,39	1,50	1,54
1,56	260,66	-206,30	-164,10	42,20	1165,30	1,55	260,62	1168,43	1,56	1,55
1,80	299,54	-203,60	-172,50	31,10	1196,40	1,59	299,68	1199,30	1,80	1,59
1,80	300,00				1196,70	1,59	300,00	1199,50	1,80	1,59
2,03	337,82	-201,90	-177,30	24,60	1221,00	1,62	337,79	1223,47	2,03	1,62
2,10	350,00				1227,72	1,63	350,00	1229,96	2,10	1,63
2,24	373,90	-200,00	-180,10	19,90	1240,90	1,65	374,58	1243,03	2,25	1,65
2,40	400,00				1252,59	1,66	400,00	1253,38	2,40	1,66
2,46	410,75	-198,30	-181,80	16,50	1257,40	1,67	410,67	1257,73	2,46	1,67
2,67	445,82	-197,40	-183,30	14,10	1271,50	1,69	445,88	1271,73	2,68	1,69
2,70	450,00				1273,01	1,69	450,00	1273,05	2,70	1,69
2,88	479,66	-197,80	-185,60	12,20	1283,70	1,70	479,88	1282,28	2,88	1,70

