UNIVERZA V LJUBLJANI Fakulteta za elektrotehniko

Borut Drnovšek

MODELIRANJE ELEKTROMAGNETNEGA SPROŽNIKA S KRATKOSTIČNIM OBROČKOM

MAGISTRSKO DELO

Mentor: izr. prof. dr. Dejan Križaj

Ljubljana, 2013

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Dejanu Križaju, ki me je s svojim znanjem in nasveti usmerjal in me podpiral pri izdelavi magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi Topčagić Zumretu, ki mi je s svojimi nasveti pomagal, da sem prišel do hitrejših rezultatov simulacij.

Zahvala velja tudi mojim staršem, ki so mi omogočili študij in me skozi vsa leta moralno in drugače podpirali.

Posebna zahvala pa gre Špeli in mojemu sinčku Žanu, ki sta me navdihnila, da sem končno uspel dokončati magistrsko delo.

Borut Drnovšek

VSEBINA

1	POVZETEK	5
2	UVOD	9
	2.1 SPLOŠNO O INŠTALACIJSKEM ODKLOPNIKU	9
	2.2 ZGRADBA INŠTALACIJSKEGA ODKLOPNIKA	10
3	SELEKTIVNI ODKLOPNIK	12
	3.1 R AZDED SEI EKTIVNOSTI INŠTALACUSKIH ODKLODNIKOV	12
	3.1 Popolna selektivnost	12
	3.1.2 Delna selektivnost	14
	3.2 ZGRADBA IN DELOVANJE SELEKTIVNEGA ODKLOPNIKA	15
	3.2.1 Zgradba selektivnega odklopnika	15
	3.2.2 Delovanje selektivnega odklopnika	16
	3.3 ZGRADBA IN DELOVANJE ELEKTROMAGNETNEGA SPROŽNIKA	17
	3.3.1 Zgradba elektromagnetnega sprožnika	17
	3.3.2 Delovanje elektromagnetnega sprožnika	18
4	METODE ZA NUMERIČNI IZRAČUN MAGNETNEGA POLJA IN SIL V	
-	ELEKTROMAGNETNEM SPROŽNIKU	20
	4.1 OSNOVNE ENAČBE ELEKTROMAGNETNEGA POLJA	20
	4.2 ROBNI POGOJI	22
	4.3 1.MAXWELLOVA ENAČBA V KROŽNO VALJNIH KOORDINATAH	23
	4.4 SILA NA KOTVO ELEKTROMAGNETNEGA SPROŽNIKA	26
5	NUMEDIČNE SIMULACUE ELEKTDOMACNETNECA SDOŽNIKA SELEKTIVNECA	
3	INŠTALACIJSKEGA ODKLOPNIKA	28
	5.1 NUMERIČNE SIMULACIJE ELEKTROMAGNETNEGA SPROŽNIKA BREZ KRATKOSTIČNEGA OBROČKA IN S	•
	KONSTANTNIM $\mu_{\rm R}$	28
	5.1.1 Izmenicni tok	32
	5.1.2 V pliv zračne reze med kolvo in jednom na goslolo magnelnega preloka	30 20
	5.1.5 Velikosi sile med jedrom in kolvo v odvisnosti od velikosti zračne reze med njima	
	J.2 ELEKTROMAGNETNI SPROZNIK BREZ KRATROSTICNEGA OBROCKA IN Z OPOSTEVANJEM RELATIVNE PERMEARII NOSTI ŽELEZA	40
	5 ? 1 Vnliv toka na gostoto magnetnega pretoka v sprožniku	42
	5.2.2 Vpliv toka na velikost magnetne sile med kotvo in jedrom	46
	5.3 ELEKTROMAGNETNI SPROŽNIK Z BAKRENIM KRATKOSTIČNIM OBROČKOM IN Z UPOŠTEVANJEM	
	RELATIVNE PERMEABILNOSTI ŽELEZA	47
	5.3.1 Vpliv toka na gostoto magnetnega pretoka v sprožniku	48
	5.3.2 Vpliv vzbujalnega toka na inducirani tok v bakrenem obročku	56
	5.3.3 Vpliv toka na velikost magnetne sile med kotvo in jedrom z vgrajenim kratkostičnim bakrenim	
	obročkom v jedru sprožnika	58
	5.3.4 Vpliv položaja vgradnje bakrenega kratkostičnega obročka na velikost sile med kotvo in jedrom.	61
	5.3.4.1 Položaj obročka na zunanji strani jedra	61
	5.3.4.2 Položaj obročka na notranji strani jedra.	63
	J.+ ELENTRUMAUNETNI SPRUZNIK Z BAKKENIM KKATKUSTIUNIM UBKUUKUM, Z UPUSTEVANJEM DELATIVNE DEDMEARII NOSTI ŽELEZA, VENDAD DDEZ MAGNETNICA JADMA	65
_	KELATI VNE FERWIEADILINUSTI ZELEZA, VENDAK BKEZ MAUNETNEUA JAKMA	05
6	ZAKLJUCEK	69
7	LITERATURA	71

Uporabljeni simboli

- $I_{\rm N}$ nazivni tok
- H magnetna poljska jakost
- B gostota magnetnega pretoka
- μ permeabilnost
- ω frekvenca
- ε dielektričnost
- ρ prostorska gostota elektrine
- σ specifična električna prevodnost
- N število ovojev tuljave
- Φ magnetni pretok
- F magnetna sila
- G električna prevodnost
- J gostota toka
- E električna poljska jakost
- v hitrost naelektrenih delcev
- K ploskovni tok
- A vektorski magnetni potencial
- D gostota električnega polja
- V električni potencial

1 Povzetek

Namen magistrske naloge je numerična simulacija magnetnega polja in sil elektromagnetnega sprožnika, ki ima vgrajen kratkostični bakreni obroček. Ta elektromagnetni sprožnik je sestavni del selektivnega inštalacijskega odklopnika, ki mora zagotoviti zakasnjen izklop v primerjavi z naknadno vgrajenimi inštalacijskimi odklopniki, s čimer preprečimo izpad celotnega sistema. Selektivnost v kratkostičnem delu izklopne krivulje se zagotovi z vgrajenim preduporom, ki omeji tok skozi selektivni inštalacijski odklopnik in posledično zakasni izklop aparata. S selektivnim inštalacijskim odklopnikom lahko nadomestimo klasične talilne varovalke tipa NV, ki se uporabljajo v priključnih omaricah.

Vse simulacije s programom COMSOL, ki deluje po metodi končnih elementov, so bile narejene v osno-simetričnem sistemu, kjer smo strukturo rotirali okoli »z« osi. Uporaba osne simetrije nam je izredno olajšala izdelavo same strukture ter povečala hitrost samega reševanja problema. Osno-simetričen sistem smo lahko uporabili, ker je elektromagnetni sprožnik skoraj v celoti osno-simetričen, saj le magnetni jarem izstopa iz osne simetrije, kar pa smo rešili s prilagoditvijo preseka samega jarma. Vse simulacije so bile narejene pri vzbujanju s harmoničnim signalom.

Enostavnejša je geometrija strukture, lažji in hitrejši je izračun s programom COMSOL. Z večanjem števila končnih elementov se izboljšujejo rezultati analize, vendar smo tu omejeni z zmogljivostjo računalnika. Pri zelo velikem številu elementov se pogosto tudi oteži konvergiranje numeričnega izračuna k rešitvi. Poleg gostote mreže pa moramo biti previdni tudi na velikost okolice, saj z zunanjimi mejami okolice definiramo področje magnetnega polja.

Najprej je v nalogi obdelan model elektromagnetnega sprožnika brez kratkostičnega obročka ter s konstantno relativno permeabilnostjo železa. V tem delu naloge smo s pomočjo simulacij ugotavljali vpliv velikosti zračne reže med kotvo in jedrom na gostoto magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku, posledično pa tudi na velikost sile med kotvo in jedrom.

V drugem delu so prikazane simulacije na elektromagnetnem sprožniku, kjer smo upoštevali magnetilno krivuljo feromagnetnih elementov elektromagnetnega sprožnika. Še vedno pa je bila to struktura brez bakrenega kratkostičnega obročka. V tem delu naloge smo preverjali vpliv vzbujalnega toka na gostoto magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku ter

posledično velikost sile med kotvo in jarmom. Hkrati je v tem delu naloge prikazan tudi prehod sestavnih delov sprožnika v področje nasičenja, ko je vzbujalni tok dovolj velik.

V tretjem delu naloge je prikazan vpliv bakrenega kratkostičnega obročka, ki je vgrajen v jedro elektromagnetnega sprožnika. Vpliv obročka je največji v času, ko je vrednost vzbujalnega sinusnega signala toka minimalna, saj je takrat pri sinusnem vzbujanju največja sprememba fluksa skozi obroček in s tem posledično največja inducirana napetost v obročku. Zaradi induktivnih in uporovnih lastnosti obročka je tok v obročku fazno zamaknjen glede na vzbujalni tok. Zaradi tega pojava se pojavi dodatna sila med kotvo in jarmom, ki je različna od nič tudi v času, ko je vzbujalni tok enak nič. Na ta način nam bakreni obroček preprečuje vibriranje gibljivega kontakta, saj nam zagotavlja stalno silo med jedrom in kotvo. Ker pa je tako velikost kot oblika induciranega toka odvisna od položaja obročka, je v tem delu naloge prikazana tudi razlika med obema skrajnima legama vgradnje bakrenega kratkostičnega obročka.

Zaradi problemov s prostorom v aparatu je v zadnjem delu naloge prikazana še zgradba elektromagnetnega sprožnika, kjer je odstranjen magnetni jarem, s čimer smo preverili možne smeri optimizacije elektromagnetnega sprožnika.

Ključne besede: selektivni odklopnik, elektromagnetni sprožnik s kratkostičnim obročkom, magnetni pretok, magnetna sila, metoda končnih elementov, COMSOL, histerezna zanka.

Abstract

The objective of the thesis is numerical simulation of magnetic field and electromagnetic forces in electromagnetically actuated magnet tripping unit with a built-in copper short-circuit ring. This tripping unit is an integral part of a <u>Selective</u> circuit breaker (SMCB) which should provide a time delayed switch off, compared to subsequently build in MCB in order to prevent breakage of the entire system. Selectivity in the short-circuit breaking part of the current signal is provided by the built-in resistor which limits the current through the selective circuit breaker. With a

selective MCB we could replace a conventional fuse type NV that are nowadays used in the distribution box.

The simulations have been performed using a numerical simulation program COMSOL Multiphysics which is based on a finite element method. Due to largely (but not completely) axial symmetric shape of the circuit breaker we have decided to design a simulation structure assuming completely axially symmetrical structure. The use of axial symmetry significantly simplifies the simulation process as it enables use of 2D simulation instead of the three-dimensional one. The nonsymmetrical magnetic yoke has been modeled by adjusting the material parameters of the simulated yoke to approximate the magnetic resistance of the yoke. All simulations were performed with harmonic signals. This could in principal lead to another simplifications of usage of complex description of Ampere's law, however, for more realistic modeling we took into account also the magnetic nonlinearities which necessitates use of time domain modeling. By increasing the number of finite elements we get more accurate analysis results, but eventually we are limited by the memory capacity of the computer. Besides the density of the mesh we need to be careful also on the size of the complete simulation area, since the boundary conditions on external borders cannot be absolutely accurately defined.

The Results section (Chapter 5) is separated to several subchapters. First we analyzed the model of an electromagnetic tripping unit without a short-circuit ring and with constant relative permeability of the iron parts. This enabled basic study of the influence of the size of the air gap between the anchor and the core on the magnetic flux density in the electromagnetic tripping unit and consequently on the magnitude of the force between the anchor and the core. As expected the force is following the sinusoidal excitation current with doubled frequency and is reaching zero at zero flux (zero current excitation). In the second part we analyzed the influence of the magnetization curve on the development of the force in the tripping unit. The magnetization of the iron core significantly influences the magnitude as well as the shape of the force between the anchor and the yoke in particular at larger current excitations. In the third part we analyzed the influence of a short-circuit copper ring which is built into the core of the electromagnetic trigger. During device operation the time variation of the flux through the ring results in induced voltage in the ring which drives the (short-circuit) current through the ring. This current builds its own magnetic field around the ring that superimposes onto the primary one. The influence of the ring is largest when the value of the current is zero as at that moment the change of the flux and the induced voltage through the

ring is largest. Due to inductive and resistive properties of the ring the induced current in the ring is phase shifted in comparison with the driving current through the coil. This results in an additional force that acts between the core and the yoke also during the time of zero excitation current. In this way the copper ring reduces vibrations of the movable contact since it ensures a non-zero force between the core and the anchor also during the time the excitation signal is zero. Simulations reveal that the size and the shape of the induced current depend on the position of the ring. In the last part of the work we analyzed the possibility of removal of the yoke as in some cases it would be advantageous to get additional space around the trigger. The simulations show that in that case the magnitude of the force between the anchor and the yoke would be significantly reduced.

We have shown that numerical simulation can be a valuable tool for analyzing behavior of electromagnetic structures such as an electromagnetic tripping unit. Simulations can be used for improved understanding of device operation but also for verification of some improvements of design and even optimizations of device operation.

Key-words: selective miniature circuit breaker, magnetic tripping unit with short circuit ring, magnetic flux, magnetic force, finite element method, COMSOL, hysteresis loop.

2 Uvod

Pri uporabi električne energije je pomembno varovanje električnih strojev, vodnikov in uporabnikov. Zaradi napak, ki se pojavljajo v električnih strojih ali vodnikih, zaradi udara strele kamorkoli v prenos električne energije se pojavljajo večji tokovi, kot pa jih zahteva porabnik. Posledice teh napak so uničeni vodniki, pokvarjeni ali uničeni električni stroji in, kar je najpomembneje, ogroženo je zdravje in življenje ljudi in živali. Da se izognemo tem posledicam, vključujemo v električne tokokroge električne varovalke kot zaščito pred preobremenitvami.

Električne varovalke so namenoma oslabljena mesta v tokokrogu, kjer se tokokrog prekine, kadar tok v tem tokokrogu prekorači določeno vrednost v določenem času.

Električne varovalke, ki se uporabljajo v industriji in gospodinjstvu, se delijo na dve vrsti:

- varovalke s talilnimi vložki (talilne varovalke),
- inštalacijski odklopniki oz. avtomatske varovalke.

Telo talilnega vložka je iz kvalitetnega steatita, zelo odpornega proti temperaturnim preobremenitvam. Pokrova sta iz aluminija in sta odporna proti učinkom korozivne atmosfere. V notranjem delu keramičnega telesa je nameščen bakreni talilni element, ki je točkasto privarjen na posebno oblikovan notranji del kontaktnega noža. Preostanek notranjosti je zasut s kremenčevim peskom točno določene granulacije in sestave. Na mestu prekinitve se pojavi oblok, ki upari bakreni talilni element in tali pesek. Hkrati se dviguje tlak v obločnem kanalu. Visok tlak požene bakrene pare v okoliški pesek, tako da v obločnem kanalu ni več kovinskih delcev, stene obločnega kanala pa so izključno iz neprevodnih materialov. Taljenje peska hkrati tudi ohlaja obločni plamen. Omenjena pojava dvigujeta obločno napetost. Ko obločna napetost preseže pritisnjeno napetost, je izpolnjen pogoj za uspešno omejevanje in posledično tudi prekinitev toka [1, stran 3].

2.1 Splošno o inštalacijskem odklopniku

Inštalacijski odklopnik ali MCB (ang. Miniature Circuit Breaker) je naprava, ki služi za zaščito pred preobremenitvami in kratkimi stiki. Večina inštalacijskih odklopnikov je zgrajena tako, da v preobremenitvenem delu izklaplja bimetal, saj morajo biti časi izklopa v tem primeru napake dokaj dolgi. Časi se gibljejo od nekaj sekund pa vse do 1 ure.

V primeru pojava kratkega stika pa izklaplja elektromagnetni sprožnik, ki zagotavlja izredno hiter izklop aparata, saj so kratkostični tokovi zelo veliki in lahko dosežejo tudi nekaj kA. Inštalacijski odklopniki se ločijo glede na izklopno karakteristiko (karakteristika proženja), kjer je definiran čas, v katerem mora aparat pri določeni vrednosti toka izklopiti.

Glede na izklopno karakteristiko razlikujemo naslednje tipe odklopnikov:

- B (za zaščito električnih vodnikov, v gospodinjstvu, ...),
- C (za zaščito naprav, ki imajo večje zagonske tokove, npr.: elektromotorji),
- D (povsod tam, kjer se pojavljajo izjemno velike kratkotrajne tokovne konice ob vklopih (npr.: določeni motorji, transformatorji, halogenske razsvetljave), da ob vklopih takih naprav ne pride do nepotrebnih izklopov).

Glavna razlika med temi tremi karakteristikami je v začetku proženja elektromagneta, saj pri B tipu elektromagnet začne delovati v področju med 3- in 5-kratnikom nazivnega toka, pri C tipu začne elektromagnet delovati v področju med 5- in 10-kratnikom nazivnega toka, pri D karakteristiki pa med 10- in 20-kratnikom nazivnega toka. Obstaja še karakteristika K, ki pa se uporablja zelo redko, in sicer je ta karakteristika nekakšen približek motorskemu zaščitnemu stikalu, saj začne elektromagnet delovati med 8- in 12-kratnikom nazivnega toka.

Največ se uporabljajo odklopniki tipa B in C.

2.2 Zgradba inštalacijskega odklopnika

Na sliki 2.1 so razvidni sestavni deli, ki določajo delovanje inštalacijskega odklopnika in s tem njegove lastnosti. Ti deli so:

a – **elektromagnetni sprožnik:** zagotavlja zahtevan prag proženja in trenutno delovanje do nazivne kratkostične zmogljivosti, z njim se definira izklopna karakteristika aparata;

b – bimetalni sprožnik: zagotavlja izklop v področju preobremenitev, to je od minimalnega toka delovanja do praga proženja elektromagnetnega sprožnika;

c – stikalni mehanizem: poskrbi, da se delovanje elektromagnetnega in bimetalnega
 sprožnika prenese na kontaktni sklop ter omogoča ročni vklop in izklop;

d – kontaktni sklop: sestavljen je iz fiksnega in gibljivega kontakta;

- e obločni kanal: po njem električni oblok potuje do gasilne komore;
- $\mathbf{f}-\mathbf{gasilna}$ komora: pogasi oblok, ki nastane med kratkim stikom.



Slika 2.1: Inštalacijski odklopnik

3 Selektivni odklopnik

Inštalacijski odklopnik (MCB) ima kar nekaj prednosti v primerjavi s talilnimi varovalkami. Prednosti inštalacijskih odklopnikov so:

- enostaven vklop,
- možnost večkratnega vklopa,
- večpolni izklop pri pojavu napake le v enem polu,
- potreben manjši prostor za vgradnjo.

Zaradi teh prednosti se je v podjetju ETI d.d. porodila zamisel, da bi tudi v priključne omarice namesto dosedanjih talilnih varovalk tipa NV vgrajevali inštalacijske odklopnike, za kar pa je potrebno razviti povsem nov selektivni odklopnik, v nadaljevanju SO. Napetostno neodvisen selektivni odklopnik že izdeluje podjetje ABB, napetostno odvisnega pa izdeluje podjetje HAGER. Oba obstoječa selektivna odklopnika sta dokaj velikih dimenzij, približno štirikratne velikosti klasičnega odklopnika. SO podjetja ETI d.d. pa bi bil velikosti 2M (dveh modulov), kar je dvakratna velikost klasičnih inštalacijskih odklopnikov. Le-ti pa zasedejo manj prostora kot pa klasične talilne varovalke tipa NV, s tem pa bi pridobili tudi nekaj prostora v priključnih omaricah. Poleg prednosti v velikosti aparata pa bi imel ta selektivni inštalacijski odklopnik tudi manjšo notranjo upornost, zaradi česar bi bile njegove lastne izgube manjše.

3.1 Razred selektivnosti inštalacijskih odklopnikov

Razred selektivnosti inštalacijskega odklopnika govori o uspešnosti njegovega delovanja pri kratkih stikih. Starejši tipi odklopnikov so prekinjali kratkostični tok šele v trenutku, ko je sinusni potek toka dosegel vrednost nič. Novejši inštalacijski odklopnik pa kratkostični tok tudi omeji in ga začne prekinjati že prej, preden le-ta doseže svojo maksimalno vrednost. Tako pri pričakovanem toku kratkega stika 10 kA (efektivna vrednost) odklopnik prekine tok že pri vrednosti 5 do 5,5 kA. Zaradi te njegove lastnosti je tudi energija, ki jo prepusti, bistveno manjša. Velikost te prepuščene energije pa je osnova za razvrstitev odklopnikov v razrede selektivnosti. Najslabši je razred 1, najboljši pa razred 3. Odklopniki, ki spadajo v razred 3, zelo dobro omejujejo kratkostični tok in prepustijo zelo malo energije.

Prepuščena energija se sprosti in porabi na samem inštalacijskem odklopniku ter na električnih inštalacijah in napravah, ki jih ta odklopnik ščiti. Odklopnik s slabšim razredom

selektivnosti prepušča bistveno več energije, ki veliko hitreje uničuje sam inštalacijski odklopnik, ki bo zato hitro dokončno odpovedal in ga bo potrebno zamenjati. Hkrati pa tak odklopnik tudi slabše opravlja svojo osnovno funkcijo (zaščita električnih inštalacij). Prihaja do večjega obremenjevanja varovane inštalacije (segrevanja), hitrejšega staranja inštalacij in tako tudi do bistveno povečane nevarnosti požara [3].

Kvaliteta odklopnikov ima za uporabnike bistveno vlogo, kajti če:

- odklopnik izklopi prezgodaj, se po nepotrebnem prekine delovni proces in lahko nastane tudi posredna škoda,
- pri trenutnem izklopu ni izklapljanja, pomeni, da je odklopnik nekaj sekund izpostavljen relativno visoki termični obremenitvi, ki pospešuje njegovo staranje in krajša življenjsko dobo,
- 3. je nizka kratkostična zmogljivost, je potrebno tak odklopnik hitro zamenjati z novim.

Prevelika prepuščena energija obremenjuje celotno inštalacijo, ki jo odklopnik ščiti, zato prihaja do močnejšega segrevanja, hitrejšega staranja in nevarnosti požara [1].

Obstajata dva nivoja selektivnosti v zaščiti električnih sistemov:

- popolna selektivnost,
- delna selektivnost.

3.1.1 Popolna selektivnost

Popolno selektivnost imamo v primeru, ko odklopnik bližje napaki izklopi, odklopnik bližje napajanju pa ostane vklopljen, s čimer zagotovimo maksimalno razpoložljivost sistema. Popolna selektivnost mora biti dosežena v obeh področjih delovanja, in sicer tako v preobremenitvenem (t > 0,1s) kot tudi v kratkostičnem področju (t < 0,1s) delovanja odklopnika. Za boljšo predstavo si poglejmo sliko 3.1, kjer je prikazana popolna selektivnost med dvema inštalacijskima odklopnikoma.



Slika 3.1: Prikaz popolne selektivnosti med dvema inštalacijskima odklopnikoma

3.1.2 Delna selektivnost

V primeru, da pogoj popolne selektivnosti ni izpolnjen do pričakovanega kratkostičnega toka, govorimo o delni selektivnosti. Poglejmo si sliko 3.2, kjer je prikazana delna selektivnost dveh inštalacijskih odklopnikov.



Slika 3.2: Prikaz delne selektivnosti med dvema inštalacijskima odklopnikoma

Na sliki 3.2 se lahko vidi, da je selektivnost izpolnjena le v preobremenitvenem delu obeh odklopnikov, v kratkostičnem delu pa je čas izklopa obeh odklopnikov enak, zato pogoj selektivnosti ni izpolnjen. Do tega pride, ker aparat 2 nima časovne zakasnitve trenutnega delovanja pri kratkostičnem toku.

3.2 Zgradba in delovanje selektivnega odklopnika

3.2.1 Zgradba selektivnega odklopnika

V moji diplomski nalogi je že bilo opisano delovanje selektivnega odklopnika, vendar je bila zgradba in princip delovanja aparata takrat malo drugačen. Ker smo z meritvami prišli do zaključka, da dvokotveni elektromagnetni sprožnik ne deluje dovolj zanesljivo, smo naredili rekonstrukcijo celotnega aparata ter seveda tudi elektromagnetnega sprožnika.

Zgradba selektivnega odklopnika je zelo podobna zgradbi klasičnega inštalacijskega odklopnika. Za boljše razumevanje delovanja selektivnega odklopnika si na tem mestu poglejmo sliko 3.3, kjer je prikazana njegova zgradba, hkrati pa je opisana tudi razlaga zgradbe aparata.

Začetni sestavni del selektivnega odklopnika ter vseh inštalacijskih odklopnikov sta ohišje **1** ter pokrov. Ohišje in pokrov morata biti narejena iz električno neprevodnega materiala in morata omogočati nizanje stikal v baterijo na zbiralni letvi.



Slika 3.3: Selektivni odklopnik

V ohišju sta vstavljeni dve sponki, in sicer dovodna sponka 2 in odvodna sponka 3. Nato je v ohišju nameščen elektromagnetni sprožnik 4, katerega podrobnejšo sestavo si bomo ogledali v enem od naslednjih poglavij.

Glavni sestavni del, ki pa ga v klasičnem inštalacijskem odklopniku ni, je predupor 5, ki skrbi za selektivni odklop aparata. Pomemben del selektivnega odklopnika je tudi sekundarni bimetal 17, ki je zaporedno vezan na predupor.

Povezava med fiksnim kontaktom 6 ter priključnimi sponkami 2 je izvedena preko gibljivega kontakta 7. Na fiksni kontakt 6 je privarjena tuljava elektromagnetnega sprožnika 16, ki je potem na svojem drugem koncu privarjena na odvodno sponko 3.

Za izredno hiter izklop aparata skrbi stikalni mehanizem, ki ga sestavljajo: stikalni vzvod **8**, kljukica **9**, stikalni locen **10** ter gumb **11**.

Obločni sklop selektivnega odklopnika pa sestavljajo: ploščica obločnega kanala **12**, gasilna komora **13** ter obločno gasilni kanal **14**.

Poleg vseh teh sestavnih delov pa potrebujemo še zaskočnik **15**, s katerim lahko aparat pritrdimo na DIN letev.

3.2.2 Delovanje selektivnega odklopnika

V primeru normalnega obratovanja selektivnega odklopnika, to je področje do 1,2-kratnik nazivnega toka, teče tok čez dovodno sponko preko gibljivega kontakta na fiksni kontakt in naprej preko tuljave na odvodno sponko. Aparat v tem področju delovanja ne sme izklopiti, saj je tok manjši od preobremenitvenega toka.

V primeru pojava preobremenitvenega toka, to je tok od 1,2-kratnika pa do 6,25-kratnika nazivnega toka, je potek oz. pot toka popolnoma ista, razlika je v tem, da bo v tem področju izklopil bimetalni sprožnik, ki je indirektno ogrevan s pomočjo tuljave elektromagnetnega sprožnika.

Ko se pojavi kratkostični tok, to je tok višji od 6,25-kratnika nazivnega toka, pa začne delovati elektromagnetni sprožnik. Ko ta tok steče skozi tuljavo elektromagnetnega sprožnika, povzroči osni pomik kotve do jedra. S tem se igla pomakne in povzroči razklenitev glavnega kontakta, zaradi česar steče potem tok skozi pomožni kontakt preko bimetalnega sprožnika in

vgrajenega predupora na odvodno sponko. Ob razkleniti glavnega kontakta se pojavi električni oblok, ki se pogasi preko gasilne komore.

Če je pojav kratkostičnega toka le kratkotrajen, se povečano elektromagnetno polje, ki ga ustvari tuljava elektromagnetnega sprožnika, zmanjša na prvotno vrednost in zato se glavni kontakt znova sklene.

Če pa je pojav kratkostičnega toka dolgotrajnejši, se zaradi povečanega toka skozi pomožni kontakt in s tem tudi bimetalni sprožnik, bimetalni sprožnik začne upogibati in pritisne na stikalni mehanizem, zaradi česar aparat po določenem času izklopi. V tem primeru je povrnitev aparata v normalno obratovanje možno samo ročno preko gumba.

3.3 Zgradba in delovanje elektromagnetnega sprožnika

3.3.1 Zgradba elektromagnetnega sprožnika

Eden od najpomembnejših sestavnih delov tega selektivnega inštalacijskega odklopnika je elektromagnetni sprožnik, ki poleg predupora skrbi za selektivno izklapljanje v kratkostičnem področju delovanja selektivnega inštalacijskega odklopnika. Na sliki 3.4 je prikazana zgradba elektromagnetnega sprožnika.



Slika 3.4: Skica sprožnika v osni simetriji

Na sliki 3.4 je prikazana zgradba sprožnika. Slika je narisana v osni simetriji in je enaka, kot se bo v nadaljevanju uporabljala pri simulacijah. Glavni parameter je širina zračne reže med

malo kotvo in jedrom, ki v normalnem režimu obratovanja avtomata znaša 2,5 mm in se v primeru preobremenitve zmanjša oziroma je ni več, saj se kotva in jedro združita. Jedro je fiksni del magnetnega sprožnika, na katerem je pritrjen jarem, tako da je zračna reža med jedrom in jarmom minimalna. Se pa na drugem koncu jarma pojavi zračna reža med jarmom in kotvo, saj se med njima nahaja izolacijska cevka, ki služi za pozicioniranje in vodilo kotvi. Na aluminijasto cevko je navita tuljava. V našem primeru se na njej nahaja 8 ovojev izolirane in na koncu razmaščene žice. Sprožnik pa sestavlja še en pomemben del, in sicer je to udarna igla, ki je osno pomično nameščena v jedru in se na eni strani nalega na kotvo, na nasprotni strani pa prosto moli izven jedra. V primeru klasičnega inštalacijskega odklopnika je zgradba elektromagnetnega sprožnika popolnoma identična do sedaj opisani zgradbi. Razlika med selektivnim elektromagnetnim sprožnikom in klasičnim elektromagnetnim sprožnikom je v bakrenem obročku. Ta obroček skrbi, da selektivni inštalacijski odklopnik tudi v kratkostičnem področju obratovanja zagotovi selektivnost v primerjavi s klasičnim inštalacijskim odklopnikom.

3.3.2 Delovanje elektromagnetnega sprožnika

Ko skozi tuljavo teče tok, se v jedru, kotvi in magnetnem jarmu vzpostavi elektromagnetno polje in posledično sila med kotvo in jedrom. Ko je sila med kotvo in jedrom tako velika, da preseže silo vzmeti med kotvo in jedrom, se začne kotva gibati proti jedru. Hkrati pa mora sila med kotvo in jedrom premagati tudi proti-silo vzmeti gibljivega kontakta. Zato mora biti ta sila večja od sile, s katero gibljivi kontakt pritiska na fiksni kontakt.

Ena izmed poglavitnih zahtev je, da sprožnik začne delovati pri 6,25-kratniku nazivnega toka, ki je meja med preobremenitvenim in kratkostičnim tokom. Pri tem toku se mora kotva začeti premikati proti jedru, s čimer premakne udarno iglo. Ta nato premakne glavni gibljivi kontakt in s tem razklene glavni tokokrog. Ker tok v tem primeru ne more več teči po prvotni poti, steče skozi predupor in bimetal po pomožnem tokokrogu. Velikost toka je sedaj omejena z velikostjo vgrajenega predupora. Ker imamo vgrajen upor, katerega upornost znaša 600 m Ω , je maksimalen tok, ki steče skozi selektivni odklopnik, približno 400 A. Ker gibljivi kontakt primarnega tokokroga drži odprt elektromagnetni sprožnik, je potrebno zagotoviti dovolj veliko silo med kotvo in jedrom tudi v času na vsake 10 ms, ko gre sinusni tok skozi

nič, saj bi se v nasprotnem primeru pojavilo vibriranje gibljivega kontakta in s tem varjenje med gibljivim in fiksnim kontaktom. Da smo odpravili to neželeno vibriranje gibljivega kontakta, smo v jedro elektromagnetnega sprožnika vgradili bakreni obroček, ki v popolnosti odpravi to vibriranje.

Po določenem času pojava kratkostičnega toka se bimetal segreje in posledično upogne, zaradi česar pritisne na stikalni mehanizem in izklopi aparat. Če se kratkostični tok v času, krajšem od 30 ms, zmanjša na normalno vrednost, ki je manjša oziroma enaka nazivni vrednosti selektivnega inštalacijskega odklopnika, se mora znova skleniti glavni kontakt, s čimer se znova vzpostavi primarni tokokrog.

4 Metode za numerični izračun magnetnega polja in sil v elektromagnetnem sprožniku

4.1 Osnovne enačbe elektromagnetnega polja

Za vakuum in neferomagnetne materiale velja Ampéreov zakon

$$\oint_{L} \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_0 \boldsymbol{I}. \tag{4.1}$$

Enačba (4.1) nam pove povezavo med tokom I kot povzročiteljem magnetnega polja in vektorjem gostote magnetnega pretoka **B**. Diferencialna oblika enačbe (4.1) je

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{J}, \tag{4.2}$$

kjer je J gostota konduktivnega toka.

Poleg konduktivnega toka J pa lahko upoštevamo še t.i. »premikalni« tok. Ko upoštevamo še ta tok, pa dobi enačba (4.2) obliko

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{J}_{cond} + \mu_0 \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} .$$
(4.3)

Pri obravnavi magnetnih pojavov v prostoru, v katerem se nahajajo tudi feromagnetni pojavi, je bolj primerno uporabiti zapis Ampereovega zakona z jakostjo magnetnega polja H

$$\oint_{I} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l} = I , \qquad (4.4)$$

kjer je

$$I = \int_{A} \boldsymbol{J} \cdot d\boldsymbol{A} \tag{4.5}$$

tok, ki ga zaobjema zanka L, A pa je površina, ki jo popisuje ta zanka.

Za vakuum (in neferomagnetne materiale) velja zveza $B = \mu_0 H$ in torej enačba (4.3) dobi obliko

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_{cond} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \ . \tag{4.6}$$

Izraz predstavlja I. Maxwellovo diferencialno enačbo.

Za kvazistatično polje lahko izpustimo v enačbi (4.6) še člen $\frac{\partial D}{\partial t}$ in dobimo enačbo

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_{cond}.$$
 (4.7)

Za FEM analizo se uporablja deskritiziran zapis enačb 4.6 in 4.7 v diferencialni obliki.

Na trgu obstajajo različni simulacijski programi, s pomočjo katerih se da simulirati razmere v elektromagnetnem polju. Jaz sem izbral simulacijski program COMSOL Multyphisics, saj je nadgradnja programa FEMLAB, s pomočjo katerega sem že opravljal simulacije za potrebe diplomske naloge.

Različni moduli simulacijskega programa COMSOL omogočajo reševanje raznovrstnih problemov kot so elektromagnetika, fluidika, termodinamika, kemijske sestavine, mehanika,...

V našem primeru smo problem reševali z AC/DC modulom, ki omogoča poleg ostalih tudi reševanje magnetostatičnih problemov.

Enačba 4.7 je zelo podobna enačbi, ki jo uporablja program COMSOL za izračun magnetostatičnega polja v 2D osno simetričnem sistemu. Z upoštevanjem izraza $H = B/\mu$ in B = rotA dobimo enačbo, ki jo uporablja COMSOL, če uporabljamo simulacijo v 2D sistemu z osno simetrijo:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \boldsymbol{B}) - \sigma \boldsymbol{\nu} \times \boldsymbol{B} = J_{\text{cond}}, \tag{4.8}$$

kjer lahko člen, $\sigma v \times B$, ki je posledica premikanja nabojev, zanemarimo. Tako nam v enačbi ostaneta le še člena:

 $\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$, ki predstavlja inducirane tokove ter $\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \mathbf{B})$, ki je enak izrazu rot \mathbf{H}

Kot lahko vidimo je končna oblika enačbe, ki jo COMSOL uporablja za izračun magnetostatičnega polja zelo podobna enačbi (4.7), saj se glasi

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \boldsymbol{B}) = J_{cond} \quad .$$
(4.9)

Tu je zaenkrat omenjena samo prva Maxwellova diferencialna enačba, ker program COMSOL za svoje izračune uporablja prvo Maxwellovo enačbo v diferencialni obliki. Seveda pa so v splošnem za opis elektromagnetnih pojavov pomembne še ostale tri Maxwellove enačbe, ki skupaj s prvo sestavljajo osnovne enačbe elektromagnetnega polja.

Tok lahko v simulacijskem programu COMSOL podajamo kot vsiljen tok, ali pa kot tok, ki je posledica priključene napetosti.

4.2 Robni pogoji

Magnetne silnice (gostotnice) prehajajo iz ene snovi v drugo (iz železa v zrak in obratno) po lomnem <u>zakonu magnetnega polja</u> [5, stran 69].

Kjer se permeabilnost snovi skokoma spremeni in če na meji ni nikakršnega ploskovnega toka (K = 0), kar za naš primer velja, magnetne silnice izstopajo iz snovi 1 pod izstopnim kotom α_1 in vstopajo v snov 2 pod vpadnim kotom α_2 (slika 4.1).

Povezava med njimi je naslednja:

iz pretočnega zakona izvedemo $\mathbf{e}_{n1} \ge (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{K} \rightarrow \mathbf{H}_{1t} - \mathbf{H}_{2t} = \mathbf{K}$,

zaradi brezizvornosti magnetnega polja je

 $\mathbf{e}_{n1} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0 \rightarrow B_{1n} = B_{2n}$ oziroma $\mu_1 \cdot H_{1n} = \mu_2 \cdot H_{2n}$ in $\mathrm{tg} \alpha_1 / \mathrm{tg} \alpha_2 = \mu_1 / \mu_2$.



Slika 4.1: Lomni zakon v magnetiki

Pri elektromagnetnem sprožniku imamo dve različni snovi, to je feromagnetik (železo) in zrak. Vzemimo, da je snov 1 zrak, snov 2 pa železo.

Permeabilnost zraka je : $\mu_1 = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ V·s/(A·m).

Permeabilnost železa je približno: $\mu_2 = \mu_r \cdot \mu_0 = 1000 \mu_0 = 0,0012 \text{ V} \cdot \text{s/(A} \cdot \text{m)}$.

Zaradi velikega količnika μ_2/μ_1 izstopajo gostotnice pretežno pravokotno iz površine železa.

Ker pa ima program COMSOL za osnovno veličino vektor magnetnega potenciala, si na tem mestu poglejmo, kako bi se enačba za ploskovni tok glasila, če bi jo napisali s pomočjo *A*.

Ob upoštevanju nekaterih osnovnih zvez med A in H pridemo do enačbe

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_{\varphi_1}}{\partial n} - \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_{\varphi_2}}{\partial n} = K.$$
(4.10)

Pomembno je, da razumemo naravo magnetnega pretoka, ki si najraje utira pot tam, kjer je μ_r čim večji.

COMSOL sam zagotovi pravilne mejne pogoje znotraj elementov strukture, medtem ko je potrebno na zunanjih robovih okolice ročno nastaviti ustrezen mejni pogoj. Na zunanji meji nastavimo pogoj

$$\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{A} = \boldsymbol{0}, \tag{4.11}$$

kar predstavlja magnetno izolacijo sistema.

To je ustrezen pogoj le za neskončno oddaljenost, zato je v praksi potrebno izbrati dovolj veliko okolico.

V našem primeru ta pogoj ne predstavlja večjega problema, saj se magnetno polje zaključuje po jarmu in je izven same strukture magnetno polje izredno majhno, kar pa nam pokažejo tudi simulacije.

4.3 1. Maxwellova enačba v krožno valjnih koordinatah

Ker smo zaradi lažjega in hitrejšega načina reševanja enačb v simulacijah uporabili model reševanja s pomočjo osne simetrije, si poglejmo osnovne enačbe krožno valjnega koordinatnega sistema.

Koordinatne ploskve so: koncentrični valji, polravnine in vzporedne ravnine. Točka T v prostoru je podana s presečiščem ploskve krožnega valja r = konst., polravnine φ = konst. in ravnine z = konst.. Spremenljivke (koordinate) so:

$$q_1 = r, \qquad q_2 = j, \qquad q_3 = z$$
 (4.12)

Enotski vektorji so:

$$\boldsymbol{e}_1 = \boldsymbol{e}_r$$
, $\boldsymbol{e}_2 = \boldsymbol{e}_{\varphi}$, $\boldsymbol{e}_3 = \boldsymbol{e}_z$. (4.13)

Enotski vektorji $\mathbf{e_1}$, $\mathbf{e_2}$ in $\mathbf{e_3}$ v smeri koordinat q_1 , q_2 in q_3 so pravokotni drug na drugega. Poleg tega vektorski produkt dveh da tretjega.

Element dolžine je:

$$d\boldsymbol{l} = \boldsymbol{e}_1 \cdot d\boldsymbol{l}_1 + \boldsymbol{e}_2 \cdot d\boldsymbol{l}_2 + \boldsymbol{e}_3 \cdot d\boldsymbol{l}_3 \quad . \tag{4.14}$$

Pri tem je d l_i (i = 1, 2, 3) element dolžine v smeri koordinate q_i . Element dolžine d l_i je proporcionalen spremembi koordinate d q_i . Faktor sorazmernosti med elementom dolžine in spremembo (elementom) koordinate imenujemo metrični ali **Lamejev** koeficient in ga označujemo s h_i (d $l_i = h_i$ d q_i).

Tako je element dolžine:

$$dl = e_1 h_1 dq_1 + e_2 h_2 dq_2 + e_3 h_3 dq_3 \quad . \tag{4.15}$$

Lamejev koeficient je določen z

$$h_{i} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial q_{i}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial y}{\partial q_{i}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial z}{\partial q_{i}}\right)^{2}} \qquad (4.16)$$

S pomočjo formule (4.16) dobimo:

$$h_1 = h_r = 1, \quad h_2 = h_{\varphi} = r, \quad h_3 = h_z = 1$$
 (4.17)

Povezavo med kartezijevimi in krožnimi valjnimi koordinatami lahko takoj zapišemo s pomočjo slike 4.2 :

$$x = r \cos \varphi, \qquad y = r \sin \varphi, \qquad z = z$$
 (4.18)

Iz te skupine enačb lahko pridemo nato do enačb

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \qquad \varphi = \arctan \frac{y}{x}, \qquad z = z$$
 (4.19)

Spremenljivke r, φ in z lahko zavzamejo vrednosti v mejah:

$$0 \le r \le +\infty, \qquad 0 \le \varphi \le 2\pi, \qquad -\infty \le z \le +\infty$$
 (4.20)



Slika 4.2: Krožno valjni koordinatni sistem

.

Rotor v splošnih pravokotnih koordinatah:

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{B} = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \begin{vmatrix} \boldsymbol{e}_1 h_1 & \boldsymbol{e}_2 h_2 & \boldsymbol{e}_3 h_3 \\ \frac{\partial}{\partial q_1} & \frac{\partial}{\partial q_2} & \frac{\partial}{\partial q_3} \\ h_1 B_1 & h_2 B_2 & h_3 B_3 \end{vmatrix}$$
(4.21)

Ker imamo v našem primeru zaradi rotiranja okoli osi z opraviti s krožno valjnim koordinatnim sistemom, si poglejmo vrednost rot B v krožno valjnih koordinatah:

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{B} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \boldsymbol{e}_{r} & \boldsymbol{e}_{\varphi} r & \boldsymbol{e}_{z} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \varphi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_{r} & rB_{\varphi} & B_{z} \end{vmatrix}$$
(4.22)

Potem, ko smo pogledali, kako se izračuna rot B v krožno valjnih koordinatah, si poglejmo še 1. Maxwellovo enačbo v krožno valjnih koordinatah. Kot smo videli, se 1. Maxwellova enačba lahko zapiše:

$$\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \boldsymbol{B}) - \sigma \boldsymbol{\nu} \times \boldsymbol{B} = J_{\varphi} .$$
(4.23)

Če na levi strani enačbe predvidimo, da je v = 0 ter da nimamo induciranega toka, se enačba poenostavi in jo lahko zapišemo:

$$\operatorname{rot}\left(\mu_{0}^{-1}\mu_{r}^{-1}\operatorname{rot}\boldsymbol{A}\right) = J_{\varphi} . \tag{4.24}$$

Ko s pomočjo enačbe (4.23) rešimo izraz rot($\mu_0^{-1}\mu_r^{-1}$ rot**A**), dobimo 1.Maxwellovo enačbo v krožno valjnih koordinatah, ki se glasi:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \left(r \mu^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix} + \mu^{-1} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} u \right) = J_{\varphi} \quad , \tag{4.25}$$

kjer je »u« odvisna nenična komponenta magnetnega potenciala (A_{φ}), deljenega z radialno koordinato r. To transformacijo izvedemo, da se izognemo singularnosti na simetrični osi [6, stran 3-37].

4.4 Sila na kotvo elektromagnetnega sprožnika

Na meji dveh različnih permeabilnosti deluje sila, ki ima smer normale na mejno ploskev in je usmerjena v prostor z manjšo permeabilnostjo. To pomeni, da je sila usmerjena iz kotve v zračno režo in iz jedra v zračno režo. Kotva in jedro se skušata približati, vendar, ker je jedro pritrjeno na jarem, se premika le kotva. Koristna ploskovna sila, ki bo premaknila kotvo, deluje le na horizontalnih ploskvah kotve. Na to silo torej vplivajo le magnetne silnice oz. magnetno polje, ki izstopa iz čelne ploskve kotve. Silnice, ki izstopajo iz stranske ploskve kotve, določajo silo, ki skuša kotvo raztegniti, ne pripomore pa nič k premiku kotve. Koristna ploskovna sila v nekoliko poenostavljeni obliki [15, stran 382] se glasi:

$$f = \frac{1}{2} \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 \cdot \mu_2} \left[\frac{\mu_2}{\mu_1} B_{1t}^2 + B_{1n}^2 \right] .$$
(4.26)

 B_{1n} je normalna, B_{1t} pa tangencialna komponenta gostote magnetnega pretoka v prostoru z μ_1 (zrak), μ_2 pa je permeabilnost železa. Pri obravnavi lomnega zakona smo ugotovili, da vektor magnetnega pretoka vstopa pravokotno v prostor z manjšo permeabilnostjo (zrak), če je

 $\mu_2 \gg \mu_1$. Zato lahko običajno zanemarimo tangencialno komponento gostote magnetnega pretoka ($B_{1t} = 0$) in dobimo poenostavljeno obliko enačbe (4.26) :

$$f = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_1} B_{1n}^2 \quad . \tag{4.27}$$

Integral ploskovne sile po mejni ploskvi A med obema permeabilnostima nam da celotno silo:

$$F = \int_{A} f dA \quad . \tag{4.28}$$

Ker imamo v našem primeru krožno valjni koordinatni sistem, je d $A = 2\pi r \cdot dr$.

Sila na kotvo za obravnavani elektromagnetni sprožnik je:

$$F = \int_{0}^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} f \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr \quad .$$
(4.29)

Nas zanima, kolikšna magnetna sila deluje na kotvo, oziroma pritiska kotvo na jedro. Če imamo podano porazdelitev gostote magnetnega pretoka na meji med kotvo in zračno režo, lahko magnetno silo izračunamo s pomočjo enačbe (4.29). Sedaj se magnetna sila glasi:

$$F = \pi \cdot f \cdot \left(r_2^2 - r_1^2\right). \tag{4.30}$$

To enačbo bi uporabili, če bi računali sile s pomočjo magnetnega vezja. Poslužil se bom enostavnejšega načina in bom računal silo s pomočjo računalniškega programa COMSOL, ki omogoča izračun sile s pomočjo Maxwellovega tenzorja napetosti (ang. Maxwell Stress Tensor) (COMSOL 4.2a, Dynamic Help)

$$\vec{n}_1 T_2 = -\frac{1}{2} \vec{n}_1 \left(\vec{H} \cdot \vec{B} \right) + \left(\vec{n}_1 \cdot \vec{H} \right) \vec{B}^T , \qquad (4.31)$$

ki predstavlja površinsko silo, ki jo je potrebno še integrirati, da dobimo sumarno silo. V našem primeru zaradi simulacije strukture v osni simetriji uporabimo enačbo (4.29).

5 Numerične simulacije elektromagnetnega sprožnika selektivnega inštalacijskega odklopnika

V tem poglavju bomo opravili različne tipe simulacij, ki nam bodo potrdili smiselnost uporabe bakrenega kratkostičnega obročka v elektromagnetnem sprožniku.

Začeli bomo z enostavnimi simulacijami, ki nam bodo pokazale osnovni princip delovanja elektromagnetnega sprožnika, kasneje pa bomo nadgrajevali naš model do končnega najzahtevnejšega modela sprožnika. Kot najenostavnejši primer bomo prikazali rezultate simulacij, kjer bomo vzeli konstanten μ_r , hkrati pa tudi ne bo vgrajenega bakrenega kratkostičnega obročka. Nadaljevali bomo s simulacijami, kjer bomo upoštevali magnetilno krivuljo za železo in s tem dejstvo, da je $\mu_r = f(\mathbf{B})$. Sledile bodo simulacije, kjer bomo poleg magnetilne krivulje železa upoštevali tudi funkcijo bakrenega obročka. Opravile se bodo simulacije z različnim položajem bakrenega obročka, s čimer bomo prikazali, da je prispevek sile, ki je posledica induciranega polja v bakrenem obročku, zelo odvisen od položaja vgrajenega bakrenega kratkostičnega obročka. Nazadnje pa bomo prikazali še vpliv magnetnega jarma na velikost sile med kotvo in jedrom.

5.1 Numerične simulacije elektromagnetnega sprožnika brez kratkostičnega obročka in s konstantnim μ_r

Najprej bom prikazal elektromagnetno polje v poenostavljenem elektromagnetnem sprožniku, kjer bo μ_r konstanten in kjer ne bo vgrajenega bakrenega kratkostičnega obročka.

Elektromagnetno polje bo posledica izmeničnega toka skozi tuljavo. V nadaljevanju pa bom potem prikazal potek sile med kotvo in jedrom v odvisnosti od velikosti zračne reže med kotvo in jedrom.

Za začetek si poglejmo nastavitve v simulacijskem programu COMSOL, ki so bile potrebne, da smo prišli do pravilnih rezultatov. Kot prvo je potrebno seveda ustrezno narisati strukturo. Ker smo lahko zaradi oblike elektromagnetnega sprožnika uporabili osno simetrijo, nam je to zelo olajšalo celotno delo, saj nam ni bilo treba risati 3D strukture. Glede na to, da so se opravile simulacije s pomočjo osne simetrije, je bilo potrebno magnetni jarem prilagoditi, saj je to edini element elektromagnetnega sprožnika, ki ne zadosti pogojem osne simetrije. V mojem primeru sem vzel manjšo debelino jarma, s čimer sem dobil približno enak presek, kot ga ima jarem dejansko. Lahko pa bi tudi prilagodil relativno permeabilnost železa za jarem, s čimer bi prišel do enakih rezultatov.

Ko je narisana struktura v osni simetriji, pa je potrebno določiti materiale za posamezne dele te strukture.

Materiale lahko izberemo iz knjižnice, ki jo ima COMSOL, lahko pa tudi ročno nastavimo določene parametre, s čimer definiramo materiale posameznim sestavnim delom strukture. Ker je knjižnica simulacijskega programa zelo bogata z materiali, sem materiale izbral kar iz te knjižnice.

Izbrati je bilo potrebno sledeče materiale:

- 4. zrak (okolica, zračne reže),
- 5. baker (tuljava, kratkostični obroček v nadaljevanju),
- 6. železo (kotva, jedro, magnetni jarem),
- 7. plastika (udarna igla).

Ko imamo izdelano geometrijo simulacijske strukture, ki je razdeljena na posamezne elemente, se tem elementom določijo materiali. Te materiale določimo v Materials, ki je podzavihek Model-a. Glej sliko 5.1.



Slika 5.1: Definiranje materialov sestavnim delom strukture

Ko je narisana struktura ter določeni materiali, ki to strukturo sestavljajo, pa je potrebno določiti parametre, ki so potrebni za zagon simulacije.

Prvi parameter, ki ga je bilo potrebno nastaviti, je sinusni tok, ki smo ga nastavili kot parameter zaradi lažjega nadaljnega spreminjanja. Definirali smo ga kot I v Single-Turn Coil Domain, ki je podzavihek Magnetic Fieldsa, kar je prikazano na sliki 5.2.



Slika 5.2: Definiranje toka skozi navitje

Ker pa je ta tok definiran kot parameter, pa je bilo potrebno ta parameter določiti. Določili smo ga v Global Definitions in njegovem podzavihku Variables 1a, kar je prikazano na sliki 5.3.



Slika 5.3: Določitev parametra toka

Ker smo za začetek opravili simulacije s konstantno relativno permeabilnostjo železa, je bilo potrebno le-to nastaviti. Nastavi se v zavihku Amperes Law1, ki se nahaja v Magnetic Fields, kar je prikazano na sliki 5.4.

🍯 reža 01mm BH sinus 100A_short.mph - COMSOL Multiphysics		Pages, and South Red Toront.			
File Edit View Options Help					
1 Model Builder		🔛 Settings 🛛 🛄 Model Library	2 - D		
 ✓ reža 01mm BH sinus 100A_short.mph (root) ✓ Global Definitions Pi Parameters a= Variables 1a ✓ Model 1 (mod 1) ✓ E Definitions ✓ Boundary System 1 (sys1) ▷ ☑ View 1 		Ampère's Law Domain Selection Selection: All domains			
Geometry 1 Magnetic Fields (mf) Magnetic Fields (mf) Magnetic Staw1 Magnetic Issulation 1 Magnetic Insulation 1 Initial Values 1 Single-Turn Coil Domain 1		4 (overridden) 5 (overridden) 6 7 8 • Override and Contribution • Equation	·		
		 ✓ Model Inputs Temperature: T User defined 	•		
 ▷ Study 2 ▲ Results ▷ III Data Sets ▷ ↓ Views 		293.15[K] Absolute pressure: P User defined	к •		
 Efficiency Values Tables Magnetic Flux Density (mf) 2D Plot Group 4 N 1D Plot Group 5 1D Plot Group 6 		1[atm] Magnetic field: H Magnetic field (mf/mf) Magnetic field (mf/mf)	Pa ₩		
▷ No Export I 民 Reports		B Magnetic flux density (mf/mf)	•		
		Coordinate System Selection Coordinate system:			
		Global coordinate system Magnetic Field	-		
		Constitutive relation: Relative permeability $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ μ_r [User defined 3000	•		

Slika 5.4: Določitev konstantne relativne permeabilnosti železa

Kot zadnje, pa je potrebno nastaviti še gostoto mreže oz. velikost elementov, saj je potrebno najti nek kompromis med gostoto mreže in hitrostjo oz. natančnostjo izračuna. Jaz sem s poizkušanjem ter lastnimi izkušnjami določil različne gostote mreže v različnih sestavnih delih sprožnika. Kje in kako se nastavi gostota mreže (Mesh), pa je prikazano na sliki 5.5. Kot lahko vidimo na tej sliki, sem za tiste dele strukture, kjer se lahko pojavijo stresanja polja ali pa kakšne simulacijske nesingularnosti, vzel bolj gosto mrežo, s čimer sem tudi pospešil računanje. Če je mreža preredka, se lahko hitro pojavi problem nekonvergiranja rešitve ter s

🕫 reža 01mm BH sinus 100A_short.mph - COMSOL Multiphysics File Edit View Options Help 🛛 🕞 🖯 🗇 🧭 🖉 🚨 🖬 🏗 Model Builder 🛛 🗢 📹 🎓 🔚 🔠 🗖 🔛 🔐 Settings 📗 Model Library ∞ ๏ ৫ ๏ ▾ ལ ལ ལ ⊕ 🖗 🎶 ▾ ଓ େ େ 🗆 🖶 🖻 ⁻ 🗖 d Graphics a 🤨 reža 01mm BH sinus 100A_short.mph (root) Global Definitions 24 Geometric entity level: Domain Model 1 (mod1) 22 Selection Manual • Definitions K Geometry 1 ÷ 20 🔹 🏶 Materials lş _ 🏶 Air 18 Ď ۵ 🏽 😫 Copper <u>ر</u> a 🏶 Acrylic plastic 16 Basic 14 🍀 Murnaghan Lamé constants 12 Element Size 🏶 Neo-Hookean Soft Iron (without losses) Calibrate for 10 atic Fields (mf General physics Mesh 1 8 🛆 Size Predefined Normal 6 Size 1 Rree Triangula O Custom 4 Study ▼ Element Size Parameters Results Data Sets Maximum element size 🕹 Views 15 0.05 mm 8.85 Derived Values 🖂 Messages 🛿 💶 Progress 🔟 Log 📗 Results Minimum element size: Tables Magnetic Flux Density (mf) COMSOI 4.2.1.166 0.027 Opened file: reža 01mm BH sinus 100A_short.mph 2D Plot Group 4 Maximum element growth rate: 1D Plot Group 5 1.3 📐 1D Plot Group 6 Export 1 Resolution of curvature: Reports 0.3 Resolution of narrow regions 455 MB | 519 MB 📋 🕴 🧉 📓 🖩 SL (🐚 🗊 .at 🕩

tem nepravilen rezultat same simulacije. Če vzamemo zelo gosto mrežo, pa se lahko hitro pojavi problem z notranjim pomnilnikom računalnika, oz. hitrostjo izračuna.

Slika 5.5: Določitev gostote mreže strukturi

Ko se določijo vsi parametri, pa se lahko zažene simulacijo. Pri vseh nadaljnjih simulacijah sem na podoben način določeval parametre, kot je to opisano v tem podpoglavju.

Vsi rezultati, tako tabelarični kot tudi grafični, se pregledujejo v zavihku Results.

5.1.1 Izmenični tok

Najprej si na sliki 5.6 poglejmo sinusni potek vzbujalnega toka, ko je bila efektivna vrednost izmeničnega toka skozi tuljavo približno 70 A.

Ker je vsiljeni sinusni tok skozi tuljavo frekvence 50 Hz, je perioda signala 20 ms. Tok doseže svojo maksimalno vrednost po 5 ms in nato na vsakih 10 ms.



Slika 5.6: Potek vzbujalnega sinusnega toka efektivne vrednosti 70 A

Ker se zaradi toka skozi tuljavo v železu pojavi magnetno polje, si poglejmo potek oz. porazdelitev gostote magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku ob različnih časih.



Slika 5.7: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka po 35 ms pri AC toku



Slika 5.8: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka po 40 ms pri AC toku

Kot lahko vidimo na slikah 5.7 in 5.8 se gostota magnetnega pretoka s časom pri izmeničnem vsiljenem toku spreminja. V trenutku, ko gre tok skozi 0, to je pri frekvenci signala 50 Hz na vsakih 10 ms, je tudi gostota magnetnega pretoka skoraj enaka 0.

Za boljšo predstavo si poglejmo sliko 5.9, na kateri bosta prikazana tako tok kot tudi gostota magnetnega pretoka v odvisnosti od časa.



Slika 5.9: Gostota magnetnega pretoka in potek vsiljenega toka v odvisnosti od časa

Zaradi boljšega prikaza je gostota magnetnega pretoka pomnožena s faktorjem 80000, da dobimo isto vrednostno skalo. Vidimo lahko, da sta vsiljeni tok skozi tuljavo in gostota magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku popolnoma v fazi, tako je vrednost gostote magnetnega pretoka enaka 0, ko je vrednost sinusnega signala toka enaka 0.

V simulacijskem programu COMSOL smo se na začetku soočili tudi s problemom induciranega toka v tuljavi, ki pa ga v dejanskem sprožniku ni, saj smo tuljavo simulirali z 10-imi posamično zaključenimi ovoji. Ta inducirani tok nam je povzročil določeno zamaknitev magnetnega polja, zato vsiljeni tok in magnetno polje nista bila sinhronizirana. Ta problem smo rešili na dokaj enostaven način, in sicer tako, da smo tuljavi določili dokaj visoko upornost, s čimer smo preprečili induciranje toka v tuljavi.

Efektivno vrednost toka doseže signal po 2,5 ms ter nato na vsake 5 ms. Za primerjavo je na sliki 5.10 prikazana gostota magnetnega pretoka skozi elektromagnetni sprožnik v času 12,6 ms, to je v času, ko je vrednost izmeničnega toka enaka 70,7 A.



Slika 5.10: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka po 12,6 ms pri AC toku

5.1.2 Vpliv zračne reže med kotvo in jedrom na gostoto magnetnega pretoka

Vse simulacije, ki so bile narejene v tem podpoglavju, so bile narejene pri efektivni vrednosti izmeničnega toka skozi tuljavo $I_{ef} = 70,7$ A; hkrati pa je bila tudi relativna permeabilnost železa konstantna.

Začetna zračna reža med jedrom in kotvo znaša 2,5 mm. S tako veliko zračno režo dosežemo dovolj velik hod udarne igle, ki mora v primeru pojava kratkostičnega toka odmakniti gibljivi kontakt od fiksnega kontakta za vsaj 5 mm. Večji je razmak med gibljivim in fiksnim kontaktom, boljše je gašenje kratkostičnega obloka med kontaktoma.

Za začetek si poglejmo gostoto magnetnega pretoka v sprožniku pri zračni reži velikosti 2,5 mm med kotvo in jedrom, ki je prikazana na sliki 5.6.



Slika 5.6: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 2,5 mm
Na sliki 5.6 je lepo vidno, da prihaja do velikega stresanja magnetnega polja v zračni reži med jedrom in kotvo. Do tega pride, ker je zračna reža med njima relativno velika, zaradi česar je tudi gostota magnetnega pretoka v železu, in sicer tako v jedru kot v kotvi, dokaj majhna.

Na sliki 5.7 je prikazano le polje v zračni reži med kotvo in jedrom, s čimer je bolje vidno stresanje magnetnega polja v tem področju.



Slika 5.7: Podrobnejši prikaz porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 2,5 mm

Takoj, ko se kotva začne premikati proti jedru in se zračna reža med njima manjša, se tudi stresano polje zmanjšuje, posledično pa se veča gostota magnetnega pretoka v jedru in kotvi.

Za primerjavo je na sliki 5.8 prikazana gostota magnetnega pretoka v sprožniku pri velikosti zračne reže, med jedrom in kotvo, 0,01 mm. Vidimo lahko, da v tem primeru stresanja polja skoraj ni, saj je zračna reža med kotvo in jedrom minimalna.



Slika 5.8: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01 mm

5.1.3 Velikost sile med jedrom in kotvo v odvisnosti od velikosti zračne reže med njima

V prejšnjem podpoglavju je bila prikazana odvisnost gostote magnetnega pretoka v sprožniku od velikosti zračne reže med kotvo in jedrom. Ker pa je sila kvadratično odvisna od gostote magnetnega pretoka, se zato tudi sila povečuje z zmanjšanjem zračne reže.

Na grafu 5.1 je prikazan potek sile v odvisnosti od velikosti zračne reže (dx) med jedrom in kotvo.



Graf 5.1: Sila v odvisnosti od velikosti zračne reže med jedrom in kotvo

Z zmanjševanjem zračne reže med kotvo in jedrom maksimalna sila med njima strmo narašča in pri minimalni zračni reži 0,01 mm znaša že okoli 3,9 N. Na tem mestu naj ponovno opomnim, da so bile te simulacije narejena na enostavnem modelu sprožnika, kjer je bila relativna permeabilnost železa konstantna.

5.2 Elektromagnetni sprožnik brez kratkostičnega obročka in z upoštevanjem relativne permeabilnosti železa

V prejšnjem poglavju smo opravili simulacije na enostavnem modelu sprožnika, kjer je bila relativna permeabilnost železa konstantna, in sicer je znašala 3000.

Vendar pa je potrebno za realne rezultate upoštevati tudi relativno permeabilnost železa (μ_r), ki pa se z večanjem gostote magnetnega pretoka (**B**) manjša, se pravi, da je $\mu_r = f(\mathbf{B})$. V našem primeru smo za naše simulacije vzeli kar železo, ki se nahaja v bazi programa COMSOL 4.2a. Na grafu 5.2 se nahaja magnetilna krivulja za železo oz. prikaz odvisnosti gostote magnetnega pretoka (**B**) od magnetne poljske jakosti (**H**)



Graf 5.2: Gostota magnetnega pretoka v odvisnosti od magnetne poljske jakosti

Kot lahko vidimo na grafu, pri določeni gostoti magnetnega pretoka (B) železo preide v nasičenje. To se začne dogajati, ko je gostota magnetnega pretoka višja od 1,4 T, zato mu po

tej vrednosti gostote magnetnega pretoka začne relativna permeabilnost μ_r naglo padati in v popolnem nasičenju doseže vrednost 1, kar je tudi relativna permeabilnost zraka.

Za razliko od predhodnih simulacij je bilo potrebno sedaj nastaviti le še relativno permeabilnost kot funkcijo gostote magnetnega pretoka. Relativna permeabilnost, ki je odvisna od gostote magnetnega pretoka, se določi v Magnetic Fields, in sicer v zavihku Ampere's Law 2. V tem zavihku je potrebno določiti, za katere sestavne dele strukture bodo te nastavitve veljale, potem pa je potrebno izbrati pogoj H=f(B).

Za boljšo predstavo si poglejmo sliko 5.9, kjer je prikazano okno, kjer se nastavijo parametri, da simulacijski program COMSOL operira z relativno permeabilnostjo železa, ki je odvisna od gostote magnetnega pretoka.



Slika 5.9: *Prikaz nastavitve parametrov za* $\mu_r = f(B)$

Ko imamo določen ta zelo pomemben parameter, pa se lahko lotimo simulacij, kjer bomo lahko videli, kako se spreminja magnetno polje in posledično sila med kotvo in jedrom v odvisnosti od jakosti toka skozi tuljavo, oziroma v odvisnosti od velikosti zračne reže med kotvo in jedrom, kjer pa relativna permeabilnost železa ni več konstantna.

5.2.1 Vpliv toka na gostoto magnetnega pretoka v sprožniku

S povečevanjem toka oz. amperovojev se povečuje tudi gostota magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku. Za boljšo predstavo si poglejmo rezultate simulacij, kjer je na slikah 5.10, 5.11 in 5.12 prikazana gostota magnetnega pretoka v sprožniku pri različnih izmeničnih tokovih skozi tuljavo elektromagnetnega sprožnika.

V prvem primeru, glej sliko 5.10, smo opravili simulacijo, ko skozi navitje tuljave teče izmenični tok I_{ef} =70,7 A.



Slika 5.10: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in Ief=70,7 A

Pri tej vrednosti toka je maksimalna gostota magnetnega pretoka, ki se pojavi na prehodu iz jedra na magnetni jarem, velikosti 1,14 T. Pri tej vrednosti gostote magnetnega pretoka železo še ni prešlo v nasičenje. Oba sestavna dela, jedro in kotva, med katerima se pojavi elektromagnetna sila, pa sta pri tej vrednosti toka še daleč od nasičenja.

Na sliki 5.11 pa se že vidi, da določeni deli sprožnika prehajajo v nasičenje, predvsem jedro in magnetni jarem, ki sta volumsko manjša od kotve. Zaradi prehoda magnetnega jarma v nasičenje se del magnetnega polja sedaj zaključuje po zraku. V tem primeru je skozi navitje tuljave tekel tok I_{ef} =283 A.



Slika 5.11: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in $I_{ef}=283$ A

Na sliki 5.12 pa je prikazana gostota magnetnega pretoka, ko skozi navitje tuljave teče tok I_{ef} =1414 A. Na tej sliki se vidi, da je že večina sestavnih delov elektromagnetnega sprožnika, ki so narejeni iz železa, prešlo v nasičenje, zato se pojavlja dokaj veliko stresanje magnetnega polja in se zato posledično določena količina magnetnega polja zaključuje po zraku.



Slika 5.12: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in $I_{ef}=1414$ A

Na grafu 5.3 je prikazana razlika v gostoti magnetnega pretoka, če imamo konstantno relativno permeabilnost železa, ter če imamo relativno permeabilnost, ki je odvisna od magnetnega polja.



Graf 5.3: Gostota magnetnega polja v odvisnosti od časa za različne oblike relatvne permeabilnosti

Presek, kjer smo računali povprečno gostoto magnetnega polja, je prikazan na sliki 5.13.



Slika 5.13: Presek, kjer smo računali povprečno vrednost gostote magnetnega polja

Obe simulaciji sta bili narejeni pri velikosti izmeničnega pritisnjenega toka skozi tuljavo 400A. Vidimo lahko pomembno razliko, saj je v primeru, ko je relativna permeabilnost konstantna, maksimalna vrednost gostote magnetnega pretoka nekaj čez 5 T. Kot vemo, je to vrednost, ki je ne moremo doseči v nobenem materialu. Za razliko pa v primeru, ko uporabimo relativno permeabilnost, ki je funkcija gostote magnetnega polja, dosežemo maksimalno vrednost gostote magnetnega pretoka okoli 1,5 T. Pri tej vrednosti že večina magnetno prevodnih materialov preide v nasičenje in je njegova relativna permeabilnost zelo blizu vrednosti relatvne permeabilnosti zraka, ki je enaka 1.

5.2.2 Vpliv toka na velikost magnetne sile med kotvo in jedrom

Z večanjem toka se veča tudi gostota magnetnega pretoka v sprožniku, vendar se ta gostota veča le do nasičenja železa. Kot smo videli v prejšnjem podpoglavju, preide železo pri dokaj velikih tokovih v nasičenje.

Na grafu 5.4 je prikazan potek sile med jedrom in kotvo v odvisnosti od velikosti toka skozi tuljavo elektromagnetnega sprožnika.

Kot smo že v prejšnjih podpoglavjih pokazali, je gostota magnetnega pretoka odvisna od velikosti zračne reže. Pri vseh simulacijah v tem podpoglavju je bila zračna reža med kotvo in jedrom minimalna, in sicer je znašala le 0,01 mm.



Graf 5.4: Velikost sile v odvisnosti od toka skozi tuljavo

Kot lahko vidimo na grafu 5.4, se pri relativno majhnih vrednostih izmeničnega toka vsako njegovo povečanje zelo pozna na velikosti sile med kotvo in jedrom. Ko enkrat železni sestavni deli elektromagnetnega sprožnika preidejo v nasičenje, pa veliko povečanje toka zelo malo doprinese k povečanju sile med kotvo in jedrom.

Ker se v nasičenju gostota magnetnega pretoka skoraj ne povečuje več, se zaradi tega tudi sila, ki je kvadratično odvisna od gostote magnetnega pretoka, povečuje zelo malo.

5.3 Elektromagnetni sprožnik z bakrenim kratkostičnim obročkom in z upoštevanjem relativne permeabilnosti železa

Pri pravilnem delovanju elektromagnetnega sprožnika se mora zračna reža med malo kotvo in jedrom iz začetnih 2,5 mm zmanjšati na 0 mm. Vse to naj bi se dogajalo, ko bi tok dosegel tako imenovani kratkostični tok, ki pri aparatih, v katerih je vgrajen tovrstni sprožnik, znaša 6,25-kratnik nazivnega toka. Dovolj veliko gostoto magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku zagotovimo s pravilnim številom ovojev tuljave in pravilno izbiro materiala, iz katerega so narejeni vsi elektromagnetno prevodni sestavni deli.

Pri običajnem elektromagnetnem sprožniku se pojavi osciliranje elektromagnetne sile med jedrom in kotvo, s tem pa tudi osciliranje gibljivega kontakta, kar pa je neželeni pojav. Ob vsakem prehodu sinusnega vzbujalnega toka skozi ničlo sila med kotvo in jedrom pade na nič in zato se gibljivi kontakt odmakne od fiksnega kontakta. Zaradi vzbujalnega toka frekvence 50 Hz zato kontakt vibrira s frekvenco 100 Hz. To vibriranje je zelo problematično, saj se pri dokaj visokih tokovih ustvarijo idealni pogoji za obločno varjenje.

Zaradi tega je bilo potrebno razmisliti, kako bi lahko odpravili vibriranje gibljivega kontakta. Za najenostavnejšo in najučinkovitejšo rešitev se je pokazala vgradnja bakrenega t.i. kratkostičnega obročka v jedro elektromagnetnega sprožnika.

Bakreni obroček služi za sekundarni tokokrog, v katerem bi se, ob idealnih razmerah, induciral tok, ki bi bil v primerjavi s primarnim tokom zamaknjen za 90°. Kako obroček dejansko vpliva na potek elektromagnetnega polja v elektromagnetnem sprožniku in posledično na medsebojno silo med kotvo in jedrom, pa je opisano v nadaljevanju.

Za razliko od prejšnjih simulacij je bilo potrebno sedaj le še določiti položaj bakrenega obročka in mu določiti pravilne materialne lastnosti. Vse to se je nastavilo v zavihku Models in nato podzavihku Materials. Pot za določitev lastnosti strukture je prikazana na sliki 5.14.



Slika 5.14: Določitev lastnosti strukture

5.3.1 Vpliv toka na gostoto magnetnega pretoka v sprožniku

Kot sem že prej zapisal, pade gostota magnetnega pretoka v železu na nič, ko gre sinusni signal toka skozi nič. V primeru uporabe bakrenega obročka, ki je vgrajen v jedro elektromagnetnega sprožnika, pa se v obročku inducira določen tok, ki pripomore, da gostota magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku nikoli ne pade na nič.

Na sliki 5.15 je prikazana gostota magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku pri izmeničnem toku I_{ef} =70,1 A. Gostota elektromagnetnega pretoka je prikazana v času 35 ms, to je čas, ko je gostota magnetnega pretoka najvišja, saj v tem trenutku sinusni signal toka doseže svojo maksimalno vrednost.



Slika 5.15: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in I_{ef} =70,7 A ter času 35 ms

Pri tej vrednosti toka skozi tuljavo je maksimalna gostota magnetnega pretoka, ki se pojavi na prehodu iz jedra na magnetni jarem ter v področju jedra, kjer se nahaja kratkostični obroček, velikosti 1,2 T. Pri tej vrednosti gostote magnetnega pretoka železo še ni prešlo v nasičenje.

Na sliki 5.16 je prikazana gostota magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku pri izmeničnem toku $I_{ef}=70,7$ A, ter v času 40 ms. To je čas, ko je gostota magnetnega pretoka zaradi vzbujalnega toka najmanjša, saj gre v tem trenutku sinusni signal toka, ki teče skozi tuljavo, skozi nič.



Slika 5.16: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in I_{ef} =70,7 A ter času 40 ms

Za primerjavo si na sliki 5.17 poglejmo gostoto magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku, ki nima vgrajenega kratkostičnega bakrenega obročka, oziroma smo za material elementa, ki predstavlja kratkostični obroček, določili železo.

Na tej sliki lahko vidimo, da je v času prehoda sinusnega signala toka skozi nič gostota magnetnega pretoka v jedru in kotvi skoraj enaka nič. Za razliko pa se v istem času, 40 ms, na sliki 5.15 vidi, da se zaradi induciranega toka v obročku pojavi določeno magnetno polje v okolici bakrenega obročka.



Slika 5.17: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in I_{ef} =70,7 A ter času 40 ms; brez kratkostičnega obročka

Kot lahko vidimo na sliki 5.15, se magnetno polje zaključuje okoli bakrenega kratkostičnega obročka in je v tem področju tudi najmočnejše. Iz tega lahko sklepamo, da je položaj bakrenega obročka optimalen, saj bi v primeru, ko bi ga vgradili v kakšen drug sestavni del, dobili zanemarljivo medsebojno silo med kotvo in jedrom.

Sedaj pa si poglejmo še, kako velikost vzbujalnega sinusnega toka vpliva na gostoto magnetnega pretoka v času 40 ms. Na sliki 5.18 in sliki 5.19 je prikaz gostote magnetnega pretoka pri vzbujalnem toku 283 A skozi navitje tuljave. Na sliki 5.18 je prikazana gostota magnetnega pretoka v času 35 ms, na sliki 5.19 pa v času 40 ms.



Slika 5.18: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in I_{ef} =283 A ter času 35 ms



Slika 5.19: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in I_{ef}=283 A ter času 40 ms

Kot lahko vidimo na sliki 5.19 je gostota magnetnega pretoka okoli bakrenega kratkostičnega obročka mnogo večja od gostote magnetnega pretoka, prikazanega na sliki 5.16. Gostota magnetnega pretoka, ki je posledica induciranega toka v bakrenem kratkostičnem obročku, bi se poviševala do vrednosti, ko bi jedro oz. kotva prišla v nasičenje.

Kako elementi elektromagnetnega sprožnika, ki so iz železa, prehajajo v nasičenje, se najlepše vidi preko spreminjanja relativne permeabilnosti železa. Za lažjo predstavo si najprej oglejmo razmere v elektromagnetnem sprožniku, ko skozi tuljavo »vsilimo« tok 100 A. To je prikazano na sliki 5.20.



Slika 5.20: Relativna permeabilnost pri toku skozi tuljavo 100 A

Slika 5.20 prikazuje velikost relativne permeabilnosti v elektromagnetnem sprožniku v času 35 ms, to je čas, ko doseže sinusni signal toka skozi tuljavo maksimalno vrednost. Kot lahko vidimo, elementi sprožnika še niso prešli v nasičenje, saj je relativna permeabilnost železnih elementov v večini primerov povsod večja od 1000.

Da bi videli, kako določeni elementi elektromagnetnega sprožnika prehajajo v nasičenje, smo povečali tok skozi tuljavo na 400 A. Vrednosti relativne permeabilnosti v elektromagnetnem sprožniku pri tem toku prikazujeta sliki 5.21 in 5.22.

Na sliki 5.21 je prikazana vrednost relativne permeabilnosti po času 35 ms, to je času, ko je vrednost sinusnega signala toka skozi tuljavo maksimalna.



Slika 5.21: Relativna permeabilnost pri toku skozi tuljavo 400A in času 35 ms

Na sliki 5.21 lahko vidimo, da je večino jedra že v področju nasičenja, predvsem del, kjer je vgrajen bakreni kratkostični obroček, saj je tam presek jedra najmanjši. V nasičenju je tudi že del magnetnega jarma, vendar le tisti del, ki je bližje jedru. Za razliko od jedra pa je relativna permeabilnost v kotvi še vedno skoraj po celotnem preseku večja od 1000, kar nam nakazuje, da je še daleč od področja nasičenja.

Na sliki 5.22 pa je prikazana porazdelitev relativne permeabilnost v času 30 ms, to je v času, ko gre vrednost sinusnega toka skozi tuljavo, skozi 0, zato se v tem času pojavi le magnetno polje, ki je posledica induciranega toka v kratkostičnem bakrenem obročku.



Slika 5.22: Relativna permeabilnost pri toku skozi tuljavo 400A in času 30 ms

Za razliko od slike 5.21 lahko na sliki 5.22 vidimo, da zopet večina sestavnih delov elektromagnetnega sprožnika ni v nasičenju, ker se je jakost magnetnega polja zmanjšala pod mejo, ki povzroči nasičenje železa.

Za boljšo predstavo, kdaj material preide v področje nasičenja, si poglejmo graf 5.2, kjer je podana magnetilna krivulja za železo. V področju, ko je vrednost gostote magnetnega pretoka med 1 in 1,5 T, to je področje, kjer se krivulja začne lomiti, prehaja material v področje nasičenja. Ko postane krivulja skoraj vzporedna z x osjo, pa je material v popolnem nasičenju, saj je v tem primeru njegova relativna permeabilnost enaka 1, kar je vrednost relativne permeabilnosti za zrak.

5.3.2 Vpliv vzbujalnega toka na inducirani tok v bakrenem obročku

Ker je gostota magnetnega pretoka v času 40 ms v večji meri posledica induciranega toka v bakrenem kratkostičnem obročku, pa si na tem mestu poglejmo še odvisnost induciranega toka v obročku v odvisnosti od časa ter velikosti vzbujalnega toka skozi tuljavo.

Na grafu 5.5 je prikazan časovni potek induciranega toka v bakrenem kratkostičnem obročku za različne vrednosti vzbujalnega toka skozi tuljavo.



Graf 5.5: Velikost induciranega toka v KS obročku pri različnih velikostih vzbujalnega toka

Zračna reža med jedrom in kotvo je bila neka minimalna zračna reža in je znašala 0,01mm. Kot lahko vidimo se induciran tok v bakrenem kratkostičnem obročku povečuje z velikostjo vzbujalnega toka skozi navitje tuljave. Velja še omeniti, da bi bila v idealnih razmerah (μ r=konst.) oblika induciranega toka sinusne oblike. Ker pa jedro pri večjih vrednostih vzbujalnega toka preide v nasičenje, tudi fluks skozi obroček ni več sinusne oblike, posledično pa tudi inducirani tok.

Za lepši prikaz fazne zakasnitve med vzbujalnim in induciranim tokom si poglejmo graf 5.6, na katerem sta prikazana oba toka pri efektivni vrednosti vzbujalnega toka 250 A.



Graf 5.6: Potek vzbujalnega in induciranega toka pri $I_{eff}=250 \text{ A}$

Na grafu 5.6 lahko vidimo, da fazni zamik med vzbujalnim in induciranim tokom ni idealnih 90°, ampak je tam nekje okoli 120°. Vidimo lahko tudi, da je induciran tok popačene sinusne oblike, saj ga požene inducirana napetost, ki se inducira v bakrenem obročku, ki pa je posledica spremembe magnetnega polja po času. Fazni kot je tako odvisen od lastne induktivnosti zanke kot tudi od upornosti zanke, torej od induktivnih in uporovnih lastnosti obročka.

Poleg vzbujalnega in induciranega toka je na grafu prikazana tudi gostota magnetnega pretoka po preseku na prehodu med kotvo in jedrom. Kot lahko vidimo, vrednost gostote magnetnega

pretoka nikoli ne pade na vrednost nič, kar je posledica induciranega toka v bakrenem kratkostičnem obročku, ki se nahaja v jedru kombiniranega elektromagnetnega sprožnika.

Če gledamo graf 5.5, lahko vidimo, da se fazni zamik med vzbujalnim in induciranim tokom z večanjem vzbujalnega toka manjša in znaša okoli 110° pri efektivni vrednosti vzbujalnega toka 1.000 A.

5.3.3 Vpliv toka na velikost magnetne sile med kotvo in jedrom z vgrajenim kratkostičnim bakrenim obročkom v jedru sprožnika

Magnetni sprožnik mora odkloniti gibljivi kontakt, ko tok doseže tok »kratkega stika«, ki znaša 6,25-kratnik nazivnega toka. Pri tem toku se mora kotva premakniti proti jedru. Da pa se kotva začne premikati, mora biti magnetna sila med kotvo in jedrom dovolj velika. Sila med jedrom in kotvo se povečuje z zmanjšanjem zračne reže med kotvo in jedrom, saj se povečuje tudi jakost magnetnega polja v jedru in kotvi, sila pa je posledično odvisna od magnetne poljske jakosti. Ko se zračna reža zmanjša na minimum, mora biti stalna sila med kotvo in jedrom večja od sile, s katero vzmet deluje na gibljivi kontakt v smeri fiksnega kontakta. Ta sila ne sme nikoli pasti pod vrednostjo sile vzmeti kontakta, saj bi v tem primeru začel gibljivi kontakt vibrirati, kar pa lahko pripelje do pojava varjenja med gibljivim in fiksnim kontaktom.

Na grafu 5.4 lahko vidimo, da v primeru, ko v jedru ni vgrajenega kratkostičnega bakrenega obročka, pade sila med kotvo in jedrom na vrednost nič vsakič, ko gre sinusni signal vzbujalnega toka skozi nič, se pravi, da gibljivi kontakt vibrira s frekvenco 100 Hz.

Na grafu 5.7 pa lahko vidimo, kako je sila odvisna od velikosti vzbujalnega toka v primeru, ko imamo v jedru vgrajen bakreni kratkostični obroček. V tem primeru sila med kotvo in jedrom nikoli ne pade na nič.

Iz grafa lahko vidimo, da se sila med kotvo in jedrom pri dokaj nizkih efektivnih vrednostih vzbujalnega toka z vsakim povečanjem le-tega procentualno zelo poveča. Ko pa kotva in jedro preideta v nasičenje, je pa procentualno povečevanje sile zelo majhno, saj je gostota

magnetnega polja v obeh sestavnih delih že dosegla maksimum. Relativna permeabilnost železa je v tem primeru 1 in se železo obnaša kot zrak, zato so izgube v tem primeru zelo velike.



Graf 5.7: Potek sile pri različnih tokovih skozi tuljavo

Kot je bilo že omenjeno, ne sme prihajati do vibriranja gibljivega kontakta med preobremenitvijo, saj v tem primeru lahko pride do varjenja, kar za posledico prinese nedelovanje aparata. Zaradi tega mora biti tudi minimalna sila med jedrom in kotvo večja od proti-sile vzmeti. To proti-silo vzmeti sestavljata dve vzmeti, in sicer vzmet, ki je vgrajena v elektromagnetnem sprožniku in skrbi, da v normalnem področju obratovanja, to so tokovi do nazivne obremenitve aparata, ne prihaja do neželenega vibriranja kotve in s tem neželenih šumov v aparatu.

Druga vzmet pa je kontaktna vzmet, ki skrbi za dovolj veliko kontaktno silo med gibljivim in fiksnim kontaktom. Če je ta sila premajhna, lahko prihaja do prevelikega segrevanja aparata.

Iz prakse velja »nenapisano pravilo«, da mora biti kontaktna sila med gibljivim in fiksnim kontaktom za vsak nazivni amper aparata 0,1 N, iz česar sledi, da je potrebna kontaktna sila za aparat z nazivnim tokom 32 A približno 3 N.

Potek minimalne in maksimalne sile v odvisnosti od vzbujalnega toka si lahko pogledamo na grafu 5.8.



Graf 5.8: Potek minimalne in maksimalne sile med jedrom in kotvo pri različnih vzbujalnih tokovih skozi tuljavo

Graf 5.8 nam pokaže, da smo z določeno strukturo dobili v vsakem področju oziroma ob vsakem času dovolj veliko silo, da se ne pojavi neželeno vibriranje gibljivega kontakta.

5.3.4 Vpliv položaja vgradnje bakrenega kratkostičnega obročka na velikost sile med kotvo in jedrom

Kljub temu, da smo z obstoječo geometrijo pridobili dovolj veliko silo med kotvo in jedrom tudi v času, ko gre sinusni signal vsiljenega toka skozi nič, nas zanima, kako položaj bakrenega kratkostičnega obročka vpliva na velikost sile med kotvo in jedrom. Ker je obstoječo geometrijo jedra izredno težko izdelovati v velikoserijski proizvodnji, si poglejmo, kaj se zgodi, če si za položaj bakrenega obročka izberemo dva skrajna položaja, ki sta iz vidika velikoserijske proizvodnje veliko enostavnejša za montažo.

5.3.4.1 Položaj obročka na zunanji strani jedra

V prvem primeru si poglejmo, kaj se zgodi s silo, če vgradimo bakreni kratkostični obroček povsem na zunanjo stran jedra. Na sliki 5.23 je prikazana nova oblika strukture, na kateri so bile opravljene simulacije.



Slika 5.23: Struktura z bakrenim obročkom na zunanji strani jedra

Presek obročka je v tem primeru ostal isti, da smo lahko dobili primerjavo v velikosti sile med kotvo in jedrom, če le spremenimo položaj kratkostičnega bakrenega obročka.

Na grafu 5.9 je prikazan potek induciranga toka skozi bakreni obroček. Zaradi lažje primerjave s predhodnimi rezultati sem znova vzel iste vrednosti vzbujalnega toka, kot so bile pri grafu 5.6.



Graf 5.9: Potek vzbujalnega in induciranega toka pri $I_{eff}=250 \text{ A}$

Na grafu 5.9 lahko vidimo, da se tudi v tem primeru, ko imamo vgrajen bakreni kratkostični obroček na zunanji strani jedra, inducira tok v tem bakrenem obročku, vendar dosti manjši kot če imamo vgrajen obroček v notranjosti jedra. Kot pa lahko vidimo na naslednjem grafu, grafu 5.10, pa ta induciran tok nima nobenega vpliva na medsebojno silo med kotvo in jedrom.



Graf 5.10: Potek sile pri različnih tokovih skozi tuljavo

Na grafu 5.10 vidimo, da kljub induciranem toku v bakrenem obročku pade sila med kotvo in jedrom na nič. Glede na prikazani graf 5.10 lahko pridemo do zaključka, da obroček na skrajni zunanji strani jedra nima pozitivnega učinka na medsebojno silo med kotvo in jedrom.

5.3.4.2 Položaj obročka na notranji strani jedra

V tem primeru pa si poglejmo, kaj se zgodi s silo, če vgradimo bakreni kratkostični obroček povsem na notranjo stran jedra. Na sliki 5.24 je prikazana nova oblika strukture, na kateri so bile opravljene simulacije.



Slika 5.24: Struktura z bakrenim obročkom na notranji strani jedra

Tudi v tem primeru je ostal presek obročka isti, da smo lahko dobili primerjavo v velikosti sile med kotvo in jedrom, če le spremenimo položaj kratkostičnega bakrenega obročka. Na grafu 5.11 je prikazan potek induciranga toka skozi bakreni obroček. Zaradi lažje primerjave s predhodnimi rezultati sem znova vzel iste vrednosti vzbujalnega toka, kot so bili pri grafu 5.6 in 5.9.



Graf 5.11: Potek vzbujalnega in induciranega toka pri $I_{eff}=250 A$

Iz grafa 5.11 lahko razberemo, da je ta položaj bakrenega kratkostičnega obročka popolnoma nekoristen, saj je induciran tok v obročku minimalen, in sicer kar približno 100-krat manjši od induciranega toka, ko je bil bakreni obroček vgrajen v notranjosti jedra.

S pomočjo gornjih grafov lahko pridemo do zaključka, da mora biti bakreni kratkostični obroček vgrajen v jedru na mestu, kjer bo iz obeh strani obdan z železom. Glede na rezultate lahko z gotovostjo trdim, da mora biti obroček vgrajen v jedru tako, da se nahaja v zunanji polovici jedra, saj se je pokazalo, da se v primeru, ko je obroček popolnoma na zunanji strani, inducira v njem mnogo večji tok, kot pa če je obroček vgrajen popolnoma na notranji strani.

5.4 Elektromagnetni sprožnik z bakrenim kratkostičnim obročkom, z upoštevanjem relativne permeabilnosti železa, vendar brez magnetnega jarma

Ker želimo vedno narediti pocenitve, oziroma narediti čim bolj enostavno strukturo, pa si poglejmo, kaj se zgodi z magnetnimi razmerami v sprožniku, če mu odstranimo magnetni jarem. Nova struktura elektromagnetnega sprožnika je prikazana na sliki 5.25.



Slika 5.25: Elektromagnetni sprožnik brez magnetnega jarma

Tudi v tem primeru, ko imamo strukturo brez magnetnega jarma, nas zanima, ali se v bakrenemu obročku inducira dovolj toka, da preprečimo vibriranje gibljivega kontakta. Poleg tega pa nas zanima tudi, če takšna struktura sploh zagotovi dovolj veliko medsebojno silo med kotvo in jedrom, da premaga silo kontaktiranja.

Najprej si na grafu 5.12 poglejmo velikosti induciranega toka v bakrenem kratkostičnem obročku pri različnih tokovih vzbujanja. Zaradi lažje primerjave s strukturo, ki je imela vgrajen bakreni obroček, bomo naredili simulacije z istimi vrednostmi vzbujalnega toka, kot je to prikazano na grafu 5.5.



Graf 5.12: Velikost induciranega toka v KS obročku pri različnih velikostih vzbujalnega toka

Kot lahko vidimo, je razlika v maksimalni sili med kotvo in jedrom dosti manjša, kot je to v primeru, ko imamo vgrajen magnetni jarem (graf 5.5). Maksimalna vrednost induciranega toka, v primeru, ko imamo vgrajen magnetni jarem, znaša približno 200 A, medtem ko je ta vrednost v primeru, ko imamo strukturo brez magnetnega jarma, le približno 55 A. Poleg vsega, pa je pri minimalni vrednosti toka simulacije (efektivna vrednost toka 70A), medsebojna sila med kotvo in jedrom premajhna, da bi premagala proti-silo gibljivega kontakta. Do tega pride, ker magnetnega kroga nimamo zaključenega z magnetno prevodnim materialom, ampak se le-ta zaključuje preko zraka. Takoj, ko se zaključuje magnetni krog preko zraka, pa se pojavljajo velike izgube in s tem nižja gostota magnetnega pretoka v magnetno prevodnih materialih, posledično pa je tudi sila med jedrom in kotvo manjša. Za boljšo predstavo si poglejmo sliko 5.26, na kateri je prikazana gostota magnetnega pretoka

v času, ko tok skozi tuljavo doseže maksimalno vrednost, to je v času 35ms.



Slika 5.26: Porazdelitev gostote magnetnega pretoka pri zračni reži 0,01mm in I_{ef} =1000 A ter času 35 ms; brez magnetnega jarma

Ker pa je glavni parameter, ki nam potrdi ustreznost zgradbe elektromagnetnega sprožnika, magnetna sila med kotvo in jedrom si na grafu 5.13 poglejmo potek sile med kotvo in jedrom za različne vrednosti vzbujalnega toka.



Graf 5.13: Potek sile pri različnih tokovih skozi tuljavo

Kot lahko vidimo na grafu 5.13, šele pri vrednosti toka skozi tuljavo 500A sila med kotvo in jedrom naraste na 6N, kar bi bila potrebna sila med kotvo in jedrom, ki bi zagotovila zanesljivo delovanje aparata. Na grafu je lepo vidno, da se pojavi tudi sila, ki je posledica induciranega toka v kratkostičnem bakrenem obročku, vendar je le ta nizka, kar pa je glede na velikost sile, ki jo zagotavlja tok skozi tuljavo, pričakovano.

6 Zaključek

V preteklosti je mnogo proizvajalcev selektivnih inštalacijskih odklopnikov reševalo problem vibriranja gibljivega kontakta z uvedbo napetostno odvisnih aparatov, kjer je za selektivnost skrbela elektronika. Edini proizvajalec mehanskega selektivnega inštalacijskega odklopnika je podjetje ABB, ki pa ima dokaj velike probleme z vibriranjem gibljivega kontakta.

Zaradi tega se je v podjetju ETI porodila zamisel, da bi z vpeljavo bakrenega kratkostičnega obročka v jedro sprožnika lahko naredili izredno kvaliteten selektivni odklopnik, ki bi zadostil vsem zahtevam po standardu.

Selektivni inštalacijski odklopnik sestavljajo različni podsklopi, ki opravljajo vsak svojo nalogo, le-te pa morajo biti za zanesljivo delovanje med seboj dobro uglašene.

Z analizo rezultatov simulacije smo prišli do ugotovitve, da mora biti za preprečitev varjenja kontaktov vgrajen kratkostični bakreni obroček v jedru elektromagnetnega sprožnika. Na grafu 5.8 je prikazana sila v odvisnosti od velikosti vzbujalnega toka. Vidi se, da sila pri nižjih vrednostih vzbujalnega toka, do približno 500A, zelo strmo narašča, pri višjih vrednostih vzbujalnega toka, ko železni sestavni deli prehajajo v nasičenje, pa krivulja postaja čedalje bolj položna.

Za dosego optimalnega položaja smo naredili kar nekaj simulacij, vendar so v nalogi opisani le trije, in sicer obe skrajni legi vgradnje in pa optimalna rešitev. Glede na dobljene rezultate lahko sklepamo, da je velikost induciranega toka v obročku in posledično sila, ki je posledica tega induciranega toka, zelo odvisna od položaja vgradnje obročka ter seveda tudi od kvalitete vgradnje.

Prav tako smo s pomočjo rezultatov prišli do zaključka, da mora elektromagnetni sprožnik obvezno vsebovati tudi magnetni jarem, saj le s pomočjo tega in vgrajenega bakrenega obročka lahko zagotovimo dovolj veliko silo med kotvo in jedrom tudi v času, ko gre sinusni signal vzbujalnega toka skozi 0.

Nadaljnje možnosti bi lahko bile:

1.) Numerična simulacija v 3D sistemu, kar bi nam omogočilo pravilno upoštevanje magnetnega jarma, saj je edini sestavni del strukture, ki ni osno simetričen.

- 2.) Merjenje histerezne krivulje sestavnih delov, ki so iz magnetno prevodnega materiala. S tem bi pridobili povsem točno primerjavo med izmerjeno silo in silo pridobljeno z numerično simulacijo. Sedaj se v primeru numerične simulacije zanašamo na podatke, ki so vneseni v simulacijski program s strani proizvajalca programa.
- 3.) Iskanje ugodnejših oblik delov elektromagnetnega sprožnika s čimer bi lahko naredili optimizacijo le-tega.
- 4.) Tehnološke rešitve vgradnje bakrenega obročka saj je način vgradnje obročka zelo kompleksna operacija. Zaradi zračnih rež med materiali se sila med kotvo in jedrom manjša, zato je potrebno poiskati optimalno rešitev za tehnologijo.

7 Literatura

- 1. F. Pikl, Zaključna naloga, Ljubljana, 2001.
- M. Strehar, Inštalacijski odklopniki in njihove tehnične karakteristike, Inštalacije izdelki in oprema ter tehnologije, št. 01, 2000, stran 35-38.
- 3. ETI d.d., RETI dokumentacija.
- 4. N. Keršič, Osnove elektrotehnike II, Ljubljana, 1979.
- P. Žunko, Elektromehanski pogonski sistem za miniaturni kontaktor, elaborat 23, FE, Ljubljana, 1990.
- 6. S. Kavkler, Magistrska naloga, Ljubljana, 1988.
- 7. P. Kokelj, Elektromagnetne strukture, Ljubljana, 2000.
- 8. V. Jurjević, Tehnički priručnik, Končar Elektroindustrija d.d., Zagreb 1991.
- 9. J. Kremser, Diplomska naloga, Ljubljana, 1991.
- 10. A. R. Sinigoj, ELMG polje, Ljubljana, 1996
- 11. D. Janc, Diplomska naloga, Ljubljana, 1997
- 12. M. Željeznov, Osnove teorije elektromagnetnega polja, Ljubljana, 1991
- 13. S. Klinc, Diplomska naloga, Ljubljana, 2001
- 14. COMSOL, http://www.comsol.com
- 15. A.R.Sinigoj, Osnove elektromagnetike, Ljubljana 2002
- 16. B. Drnovšek, Diplomska naloga, Ljubljana, 2005

IZJAVA !

Izjavljam, da sem magistrsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja izr. prof. dr. Dejana Križaja.

Izkazano pomoč drugim sem v celoti navedel v zahvali.