

Načrtovanje elektromagnetnega sprožnika s pomočjo numerične simulacije

Borut Drnovšek¹, Dejan Križaj²

¹ ETI Elektroelement d.d., Obrezija 5, 1411 Izlake, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: borut.drnovsek@eti.si

Povzetek. V delu sta predstavljena numerična simulacija in načrtovanje elektromagnetnega sprožnika. Pravilno in optimalno delovanje tega elementa je ključno za razvoj nove generacije elektromagnetnih odklopnikov, ki bodo omogočali selektivno odklapanje tokokroga pri preobremenitvi in omogočali ponovni avtomatični vklop po prenehanju preobremenitve. Zaradi kompleksnosti idejnega načrta je bilo potrebno za razumevanje delovanja naprave in nadaljnjo optimizacijo uporabiti numerično simulacijo elektromagnetnega polja. Za lažje izračunavanje smo upoštevali pogoje (kvazi) magnetostatičnega polja in rotacijsko simetrijo, kar nam je omogočilo izračune polja v dveh prostorskih dimenzijah. Izračunali smo magnetno polje znotraj odklopnika ter sile, ki delujejo med fiksnimi in gibljivimi deli, predvsem silo na malo kotvo. Določili smo parametre, ki najbolj vplivajo na delovanje odklopnika in omogočajo nadaljnjo optimizacijo. Primerjava izmerjene in izračunane sile kaže zadovoljivo ujemanje rezultatov, ki jih bo mogoče izboljšati z natančnejšim poznavanjem magnetnih lastnosti uporabljenih materialov.

Ključne besede: selektivni odklopnik, inštalacijski odklopnik, numerična simulacija, elektromagnetni sprožnik

Numerical simulation aided design of the selective electromagnetic trigger

Extended abstract. This work presents numerical simulation and design of a selective electromagnetic trigger. Correct and optimal operation is crucial in development of the new generation of electromagnetic breakers since it enables both selective disconnection of the circuitry at an overload or short-circuit faults and automatic switching-on upon reduction of the overload to an admissible value. Figure 1 presents the cross-section of the analyzed structure. For the reason of the design complexity (the circuit breaker being composed of more than forty parts), better understanding of the device operation principles of the device and for the reasons of its optimization, numerical simulation tools are used. Although the device is not completely axially-symmetrical, axial symmetry was nevertheless assumed in order to simplify the design phase as well as the modeling complexity and simulation time. The result of numerical simulation based on the (quasi) magneto-static approach is distribution of the magnetic field inside the electromagnetic breaker. The device operates at high currents (current densities) giving rise to saturation of the magnetic field in certain parts of the

breaker, particularly in the small anchor (Figure 4). From magnetic field distribution forces between the moving and fixed parts of the device were determined. Compared to the measured forces (Figure 8), the simulation differs by some 20%, which is within admissible limits. Better results are expected provided electric parameters (in particular $B(H)$ curve) of the measured breaker are precisely known.

Keywords: selective electromagnetic breaker, MCB, numerical simulation, electromagnetic trigger.

1 Uvod

Pri uporabi električne energije je pomembno varovanje električnih strojev, vodnikov in uporabnikov. Zaradi napak, ki nastanejo v električnih strojih ali vodnikih ali ob udaru strele, se lahko pojavijo večji tokovi, kot pa jih zahteva uporabnik oziroma prenese naprava. Posledica teh dogodkov so uničeni vodniki, pokvarjeni ali uničeni električni stroji in, kar je najpomembnejše, ogroženo je zdravje in življenje ljudi in živali. Da se izognemo tem posledicam, vključujemo v električne tokokroge električne varovalke kot zaščito pred preobremenitvami.

Poznamo dve vrsti varovalk, in sicer predštevčne NV varovalke in klasične inštalacijske odklopnike, ki jih imamo vgrajene v razdelilnih omaricah. Selektivni inštalacijski odklopnik, v nadaljevanju SO, je predviden za zamenjavo klasičnih NV varovalk, ki se uporabljajo za zaščito vodnikov pred preobremenitvami. Zgradba SO je zelo podobna zgradbi klasičnega inštalacijskega odklopnika, ima pa hkrati kar nekaj prednosti v primerjavi s klasičnimi NV varovalkami. Vsekakor je njegova glavna prednost zmožnost ponovnega vklopa ob koncu krajše preobremenitve v tokokrogu oz. električni napeljavi.

Selektivni odklopnik je sestavljen iz okoli 40 sestavnih delov, od katerih so trije izredno pomembni: bimetalni sprožnik, gasilna komora in elektromagnetni sprožnik. V tem prispevku se bomo omejili na prikaz delovanja, načrtovanje in numerično simulacijo elektromagnetnega sprožnika.

Numerična simulacija ima vrsto prednosti pred analitičnim pristopom, predvsem je ta v veliko bolj poljubni obliki strukture, električnih lastnosti ter fizikalnih pojavov, ki jih lahko upoštevamo. Uporablja se več različnih metod numerične simulacije elektromagnetnega polja, tako v smislu zapisa osnovnih enačb, kot v načinu diskretizacije in reševanja. V našem primeru smo uporabili programski paket Femlab [1], ki temelji na diskretizaciji območja s pomočjo t.i. končnih elementov. Pri simulaciji smo predpostavili osno simetrijo sprožnika in reševanje kvazi magnetostatičnega primera. Iz izračunanega vektorskega potenciala smo določili gostoto magnetnega pretoka in druge veličine, s pomočjo integracije gostote sile (pritiska) pa izračunali še silo med jedrom in kotvijo.

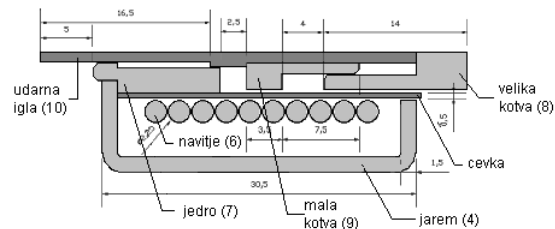
Numerična simulacija magnetnega polja omogoča vpogled v porazdelitev polja v notranjosti elektromagnetnega sprožnika in s tem olajša razumevanje delovanja naprave ter s tem boljše načrtovanje in optimizacijo naprave. Tovrstni način analize se čedalje pogosteje uporablja za izboljšanje razumevanja delovanja električnih naprav, pa tudi za pomoč pri načrtovanju in optimizaciji. V strokovni literaturi je mogoče zaslediti veliko analiz plazovitega izklopa ([2] in reference v članku), le nekaj pa je analiz numerične simulacije samega elektromagnetnega odklopnika [3, 4, 5].

Rezultati računalniške simulacije nakazujejo možnosti optimizacije sprožnika. Eden pomembnejših parametrov je zračna reža med jarmom in veliko kotvo. Na tem mestu pride do dokaj velikega stresanja polja, kar se odraža kot zmanjšanje gostote polja v jedru in obeh kotvah.

2 Zgradba elektromagnetnega sprožnika

Elektromagnetni sprožnik je najpomembnejši sestavni del selektivnega odklopnika. Na sliki 1 je prikazana

zgradba elektromagnetnega sprožnika. Slika je narisana v osni simetriji. Sprožnik je v osnovi sestavljen iz jedra, dveh kotev (male in velike) in jarma. Na veliko kotvo je vpeta udarna igla. Med tuljavo in jedrom je vstavljena izolacijska cevka, ki ima dvojno vlogo: prva je vodenje obeh kotev, druga pa je izolacija med navitjem in kotvama ter jedrom. Med jedrom in magnetnim jarmom ni zračne reže, saj je jedro zakovičeno na magnetni jarem. Se pa nahaja zračna reža na drugem koncu, kjer je med veliko kotvo in jarmom izolacijska cevka.



Slika 1: Skica sprožnika v osni simetriji.

Figure 1: Cross-section of a simulated structure.

3 Delovanje elektromagnetnega sprožnika

Elektromagnetni sprožnik naj bi začel delovati pri 1,4- do 1,6-kratniku nazivnega toka. Sprožnik, narisano na sliki 1, se bo uporabljal v aparatu, deklariranem na nazivni tok 32 A. Če preračunamo na amper - ovoje, bo začel elektromagnetni sprožnik opravljati svojo funkcijo pri okoli 500 A-ovojih, saj je na elektromagnetnem sprožniku navita tuljava z 10 ovoji. Ko v tokokrogu nastane preobremenitev, začne sila med malo kotvo in jedrom potiskati malo kotvo proti jedru. Mala kotva potiska pred seboj tudi udarno iglo, ki mora biti iz izolacijskega materiala, da ne pride do prebojev med gibljivim kontaktom in kotvo ali jedrom. Ob dovolj velikem odmiku udarne igle le-ta sproži preklon gibljivega kontakta in s tem preusmeritev poti toka na drugo vejo v aparatu.

Druga kotva začne delovati pri veliko višjih amperskih ovojih, in sicer pri okoli 2000 A-ovojev. Ta kotva nam še dodatno odmakne gibljivi kontakt, tako da je razdalja med gibljivim kontaktom in fiksnim kontaktom zahtevanih 5 mm (to je minimalna zahtevana razdalja). Ta razdalja mora biti čim večja zaradi gašenja električnega obloka med kontakti, saj pri zelo visokih tokovih, nad 1000 A, nastane med odpiranjem kontakta električni oblok, ki ga je treba čim hitreje pogasiti, saj pri prepočasnem izrivu obloka v gasilno komoro lahko pride do zvara kontaktov.

Debelina cevke in »zračnost« med cevko in jarmom ter cevko in veliko kotvo mora biti čim manjša, da je pri vzbujanju čim manj stresanega polja med jarmom in veliko kotvo, saj se s stresanjem polja zmanjša gostota magnetnega pretoka v elementih sprožnika, kar pa je zelo pomembno, saj je sila med jedrom in kotvo

približno kvadratično odvisna od gostote električnega pretoka v zračni reži.

Jarem mora biti pravilno dimenzioniran, saj pri premajhni debelini jarma preide le-to v nasičenje, s čimer se zopet zmanjša magnetni pretok v sprožniku. Funkcija jarma je zaključevanje elektromagnetne poti v elektromagnetnem sprožniku.

Izredno pomembna elementa elektromagnetnega sprožnika sta zračni reži: zračna reža med jedrom in malo kotvo ter zračna reža med malo in veliko kotvo. Začetna širina zračne reže (v normalnem obratovanju SO) med malo kotvo in jedrom je 2,5 mm.

4 Numerična simulacija

Problem, ki ga obravnavamo z numerično simulacijo, je izračun magnetnega polja v elektromagnetnem sprožniku pri vzbujanju z izmeničnim signalom frekvence 50 Hz. Zaradi nizke frekvence vzbujalnega signala (toka skozi navitje sprožnika) je mogoče sistem Maxwellovih enačb poenostaviti na t. i. (kvazi) magnetostatični način izračunavanja, kjer upoštevamo le enačbo $\text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}_{\text{cond}}$, kjer je \mathbf{H} jakost magnetnega polja in \mathbf{J}_{cond} gostota konduktivnega toka v navitju. Z upoštevanjem povezave med vektorskim magnetnim potencialom in gostoto magnetnega pretoka $\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A})$ in gostoto pretoka in jakostjo polja $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ dobimo obliko:

$$\text{rot}(\mu^{-1} \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{\text{cond}} \quad (1)$$

Program Femlab uporablja za izračun vektorskega potenciala v osni simetriji izraz [5]

$$\text{rot}(\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \text{rot} \mathbf{A}) - \sigma \mathbf{v} \times (\text{rot} \mathbf{A}) = \frac{\sigma V_{\text{loop}}}{2\pi r} + J_\varphi, \quad (2)$$

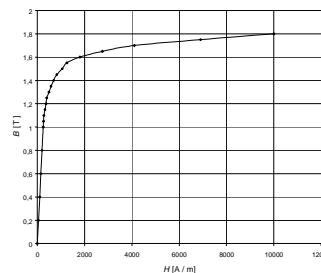
ki omogoča tudi upoštevanje hitrosti premikanja prevodnika v polju ($\sigma \mathbf{v} \times (\text{rot} \mathbf{A})$). Tokovno vzbujanje je mogoče opisati z gostoto toka v navitju J_φ ali pa s podano specifično prevodnostjo navitja in

napetostjo na en ovoj navitja $\frac{\sigma V_{\text{loop}}}{2\pi r}$. Program uporablja diskretizirano obliko te enačbe, rezultat simulacije pa je vektorski magnetni potencial, izračunan v točkah diskretizirane mreže. Druge veličine se preračunajo iz vektorskega potenciala iz zapisanih povezav.

Pri simulaciji bomo upoštevali osno simetrijo, kar pomeni, da bomo predpostavili, da je struktura osno simetrična. V našem konkretnem primeru to sicer ne drži popolnoma, saj predvsem jarem, ki skrbi za zaključitev magnetnih silnic, ni osno simetričen, pač pa je v praksi v obliki ukrivljene palice oblike črke U. To poenostavitev lahko nekoliko kompenziramo z zmanjšanjem preseka jarma pri simulaciji za toliko, da

prostornina jarma v simulaciji ustreza dejanski prostornini jarma. Druga možnost je ustrezno zmanjšanje permeabilnosti jarma. Slednji način smo uporabili pri simulaciji. Reševanje sistema enačb pri osni simetriji se bistveno poenostavi, predvsem v tem smislu, da je potrebnih veliko manj enačb kot pri uporabi popolne 3D simulacije. Primer: pri naših simulacijah smo računali tipično z $n^2 = 60.000$ točkami, pri »polni« 3D simulaciji pa jih lahko pričakujemo velikosti $n^3 = 14.700.000$. 3D simulacija je torej predvsem veliko bolj časovno potratna, v praksi pa nastanejo še dodatni problemi generacije ustrezne 3D mreže, potrebe po dodatnih računalniških zmogljivostih, bolj zapletene vizualizacije rezultatov itd.

Za največjo težavo pri simulaciji sta se izkazala primeren opis magnetnih lastnosti materialov in način samega numeričnega reševanja sistema enačb. Magnetne lastnosti materialov je mogoče v programu podati na več načinov, s pomočjo vektorja magnetizacije za permanentne magnetne oziroma z relativno permeabilnostjo. Ta je lahko konstantna, lahko je podana v obliki matematične funkcije gostote pretoka ali pa je podana v obliki tabele. Pri večjih tokovih vzbujanja moramo pričakovati, da bo jedro sprožnika v nasičenju, kar pomeni, da zapis s konstantno permeabilnostjo v našem primeru ni primeren. Uporabili smo tabelaričen zapis $B(H)$ magnetilne krivulje na sliki 3 [10]. Kljub temu je bila posebno pri velikih tokovnih vzbujanjih konvergenca numerične metode pogosto slaba ali pa program ni uspel določiti rešitve. Treba je bilo preiskusiti vrsto numeričnih algoritmov in se rešitvi "približevati" po korakih, s postopnim povečevanjem vzbujalnega toka.



Slika 3: Predpostavljena magnetilna krivulja uporabljena pri numerični simulaciji.

Figure 3: Assumed magnetisation curve for the purposes of numerical simulation.

Ob uspešnem izračunu je treba iz vektorskega potenciala določiti še preostale veličine, predvsem gostoto magnetnega pretoka. Za analizo in načrtovanje naprave pa je najpomembnejši izračun sile med jedrom in kotvo. Le-to izračunamo s pomočjo integracije normalne komponente površinske sile (pritiska), ki je izražena kot

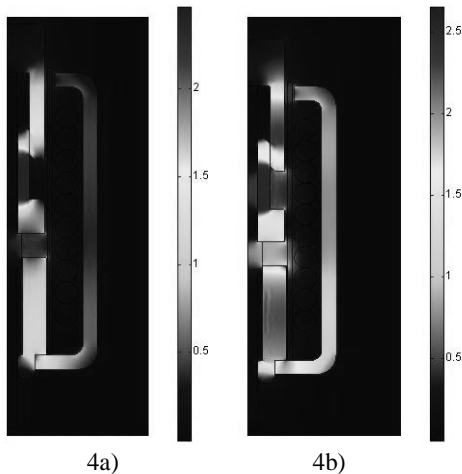
$$f = \frac{1}{2} \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 \cdot \mu_2} \left[\frac{\mu_2}{\mu_1} B_{It}^2 + B_{In}^2 \right]. \quad (3)$$

B_{It} in B_{In} sta tangencialna in normalna komponenta gostote magnetnega pretoka na površini jedra ali kotve. Izračun sile mora seveda dati enak rezultat, če integriramo po površini kotve ali po površini jedra, le nasprotnega predznaka je. Ker uporabljamo osno simetrijo, je treba pri integraciji v smeri radija za izračun sile uporabiti izraz

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} f \cdot r \cdot d\varphi \cdot dr. \quad (4)$$

5 Rezultati

Sliki 4a in 4b prikazujeta numerično izračunane absolutne vrednosti gostote magnetnega pretoka v elektromagnetnem sprožniku. V obeh primerih je bil tok skozi navitje nastavljen na večkratnik nazivnega toka. Pri tokovih, ki so manjši od 100 A, v kotvah še ne nastane nasičenje.

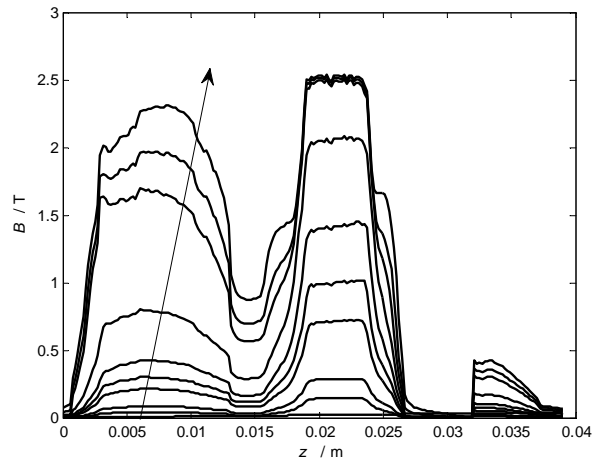


Slika 4a): Absolutna vrednost gostote magnetnega pretoka pri toku 135 A
 Figure 4a): Absolute value of magnetic field density at the current of 135 A.
 Slika 4b): Absolutna vrednost gostote magnetnega pretoka pri toku 450 A
 Figure 4b): Absolute value of magnetic field density at the current of 450 A.

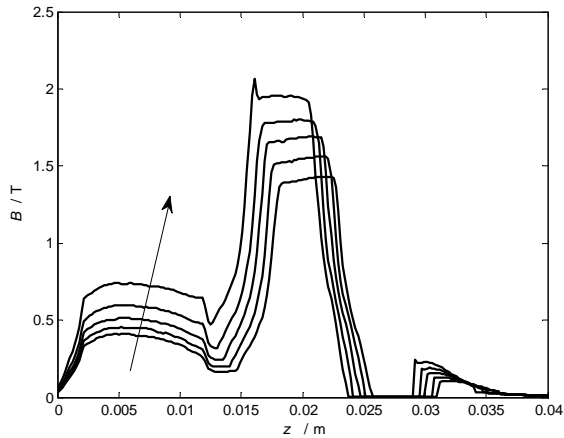
Če pa tok skozi navitje povečamo vsaj na 135 A, preide mala kotva v nasičenje. Posledično se poveča tudi jakost polja v zraku okoli male kotve. To je razvidno na sliki 4b, kjer je tok skozi navitje kar 450 A, kar je približno 14-kratnik nazivnega toka. Na tej sliki je lepo vidno nasičenje zoženega dela obeh kotev in tudi jedra.

Kot lahko vidimo na sliki 4a), nastane nasičenje najprej v mali kotvi, ki ima najmanjši presek in se zato magnetni pretok po preseku zgosti. Maksimalna gostota magnetnega pretoka je določena z magnetilno karakteristiko materiala. Pri majhnih vrednostih je permeabilnost konstantna ali pa se zlagoma veča do neke maksimalne vrednosti, pri večjih vrednostih polja pa se zmanjšuje in v nasičenju doseže permeabilnost zraka. Zato se magnetno polje širi tudi v zrak, ko preide železo v nasičenje. Nasičenje železa nastopi pri gostoti polja okrog 1,8 T. Največja gostota polja nastopi v mali kotvi in je velikosti 2,1 T pri toku 135 A in okoli 2,5 T pri toku 400 A.

Slika 5 prikazuje absolutno vrednost gostote magnetnega pretoka na oddaljenosti 1,65 mm od simetralne (Z) osi. Prerez, po katerem je prikazan potek polja, teče vzdolž osi, ki je za 1,65 mm premaknjena od osne simetrije. Pri tem prerezu so zaobjeti preseki skozi jedro, skozi zračno režo med jedrom in malo kotvo, skozi malo kotvo in del preseka skozi veliko kotvo. V grafu so podane vrednosti za tokove, ki so večkratniki preobremenitvenega toka elektromagnetnega sprožnika, ki znaša od 45 do 52 A. Na sliki 5 je razvidno, kateri deli sprožnika najhitreje preidejo v nasičenje.



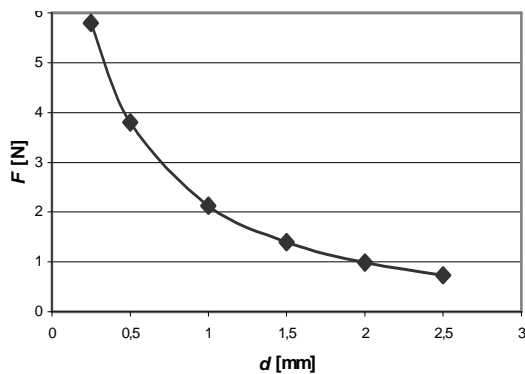
Slika 5: Absolutna vrednost gostote magnetnega pretoka po prerezu pri različnih tokih in velikosti zračne reže 2,5 mm. Množilni faktorji toka preobremenitve za posamezne krivulje, ki si sledijo v smeri puščice, so: 0,1; 0,2; 0,5; 0,7; 1; 2; 5; 7; 10. Zračna reža je med $z = 13$ in 15,5 mm. Levo je jedro, desno od zračne reže pa mala kotva (glej sliko 1).
 Figure 5: Absolute value of magnetic field density in a cross-section at different currents and air gap of 2.5 mm. Multiplication factors of overload current in the direction of the arrow are: 0,1; 0,2; 0,5; 0,7; 1; 2; 5; 7; 10. The gap is located between $z = 13$ mm and $z = 15,5$ mm.



Slika 6: Absolutna vrednost gostote magnetnega pretoka po prerezu za različne velikosti zračne reže med jedrom in malo kotvo. V smeri puščice si sledijo krivulje z d (mm): 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2,5.

Figure 6: Absolute value of magnetic field density in a cross-section at different air gap between core and small anchor.

Slika 6 prikazuje spremembo velikosti magnetnega pretoka z manjšanjem velikosti zračne reže med jedrom in malo kotvo, ki se začne pri $z = 13$ mm. Z zmanjšanjem zračne reže se zmanjšuje magnetna upornost zračne reže, s tem pa se povečuje magnetni pretok oziroma gostota magnetnega pretoka v celotnem elektromagnetnem sprožniku. Hkrati se zmanjšuje tudi stresanje polja v tem delu sprožnika. Prerez, po katerem so bili podani izračuni, je isti kot pri sliki 5.



Slika 7: Sila v odvisnosti od velikosti zračne reže pri toku preobremenitve ($1,5 I_n = 48$ A)

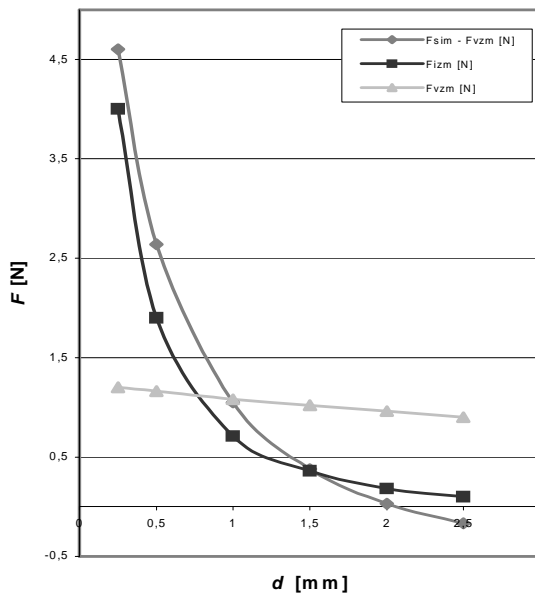
Figure 7: Force on an anchor depending on a width of the air gap for the current of 48 A.

Sila, ki je potrebna za premik udarne igle in odmik gibljivega kontakta SO od fiksnega kontakta, mora biti večja, kot je proti - sila kontaktne vzmeti in sila vzmeti kotve. Začetna zračna reža med malo kotvo in jedrom je 2,5 mm, do zračne reže 0,5 mm deluje samo proti - sila vzmeti kotve. Po hodu 2 mm pa se udarna igla nasloni na gibljivi kontakt in takrat mora sila elektromagneta premagati proti-silo obeh vzmeti skupaj. Ta proti - sila je v konkretnem primeru velika okoli 4 N.

Kot je vidno na sliki 7, je začetna sila pri velikosti zračne reže 2,5 mm okoli 0,85 N in se seveda s premikanjem male kotve proti jedru veča in doseže vrednost 7 N, ko sta mala kotva in jedro povsem skupaj. Ker se zmanjšuje aktivna zračna reža med malo kotvo in jedrom, se sila med njima veča. To večanje sile je posledica večje gostote magnetnega pretoka v kotvi in jedru, kar pa se zgodi zaradi zmanjšanja zračne reže in delno tudi stresanega polja.

Rezultate numerične simulacije smo primerjali tudi z rezultati meritev na dejanskem sprožniku. Merili smo tako statično kot tudi dinamično silo, s katero udarna igla pritiska na gibljivi kontakt. Pri tem smo za merjenje sile uporabili merilni listič (strain gage), ki je bil pritrjen na ogrodje, kamor smo lahko pritrdili tudi elektromagnetni sprožnik. Ko smo skozi navitje spustili tok preobremenitve, to je tok 45 A, se je udarna igla naslonila na merilni listič z določeno silo. To silo smo potem lahko odčitali na merilnem inštrumentu, ki ima možnost odčitavanja maksimalne sile. S pomočjo kljunastega merila in vijaka, ki pritiska na veliko kotvo, smo lahko nastavljali velikost zračne reže med jedrom in malo kotvo. Izmerjena dinamična sila je bila za približno 20% večja od izmerjene statične sile. V tem prispevku prikazujemo le rezultate simulacije in merjenja statične sile.

Na sliki 8 je prikazana sila v odvisnosti od zračne reže med malo kotvo in jedrom pri toku 45A. Na sliki sta narisani obe sili; sila, ki smo jo določili s pomočjo numerične simulacije, od katere je že odštetna proti - sila vzmeti kotve ($F_{sim} - F_{vzm}$), in izmerjena sila (F_{izm}). Na sliki je dodana še krivulja, ki prikazuje proti - silo vzmeti na malo kotvo (F_{vzm}). Kot je razvidno iz slike, so odstopanja med meritvami in numeričnimi izračuni dokaj majhna. Odstopanje je največje pri velikosti zračne reže 2,5 mm, kar je tudi začetni položaj kotev v sprožniku. V tem primeru je rezultanta dveh sil, in sicer $F_{sim} - F_{vzm}$, manjša od 0. Če bi to držalo, se v tem primeru mala kotva sploh ne bi začela gibati v smeri jedra, kar pa iz meritev ugotovimo, da ne drži. Največje relativno odstopanje nastane pri minimalni velikosti zračne reže, vendar je tudi tu relativno odstopanje manjše od 15%, kar je za poenostavljeno numerično simulacijo še sprejemljiv rezultat. Odstopanja so lahko posledica ne dovolj natančno opisane magnetilne karakteristike železa in drugih poenostavitev (tako geometrijskih kot modelskih), ki so bile uporabljene pri numerični simulaciji.



Slika 8: Izmerjena in modelirana vrednost sile v odvisnosti od širine zračne reže pri $I = 45\text{A}$.

Figure 8: Measured and calculated force depending on the width of the air gap at $I = 45\text{A}$.

6 Sklep

V prispevku smo predstavili numerično simulacijo delovanja dvokotvenega elektromagnetnega sprožnika, ki naj bi bil sestavni del nove generacije selektivnih odklopnikov. Pravilno načrtovanje in delovanje elektromagnetnega sprožnika je ključnega pomena za pravilno delovanje celotne naprave. Pri numerični simulaciji smo upoštevali magnetilno krivuljo in kvazi-magnetostatične razmere z osno - simetrično geometrijo modela. Za izračun gostote magnetnega pretoka v sprožniku smo uporabili simulacijski program Femlab, ki uporablja za izračun polja metodo končnih elementov.

Numerična simulacija je zahtevna, saj ob prehodu dela sprožnika v nasičenje postane konvergenca sistema enačb otežena. Delno smo se problemu izognili z zložitnim povečevanjem toka v navitjih in upoštevanjem predhodnih izračunov.

Največja gostota magnetnega pretoka je dosežena v mali kotvi, saj je površina preseka te kotve najmanjša. Zato bo ob (približno) enakem fluksu skozi vse magnetno prevodne dele sprožnika gostota magnetnega pretoka največja ravno v mali kotvi. Ob povečevanju toka v navitju se večja tudi sila med kotvo in jedrom, vendar ob izrazitem večanju toka navitja mala kotva prehaja v nasičenje. Ko preide ta del sprožnika v nasičenje, se učinkovito večja zračna reža in s tem tudi manjša fluks oziroma sila na kotev.

Primerjava med rezultati numerične simulacije in meritev na realiziranih testnih sprožnikih pokaže

določeno ujemanje. Razlike je treba iskati v nepoznani magnetilni krivulji materiala, poenostavitvi geometrijske oblike sprožnika in matematične obravnave elektromagnetnih pojavov. Nadaljnje raziskave bodo namenjene dinamičnim razmeram v sprožniku, ki v končni fazi oblikujejo razmere, ki jih bomo srečali pri delovanju sprožnika v praksi.

7 Literatura

- [1] Femlab user's guide and introduction. Version 2.3. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [2] J.W. McBride, P.M. Weaver, review of arcing phenomena in low voltage current limiting circuit breakers, IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol. 148, No. 1, pp. 1-7, 2001.
- [3] L. Erping, P.M. McEwan. Analysis of a circuit breaker solenoid actuator system using the decoupled CAD-FE integral technique. IEEE Transactions on magnetics, Vol. 28, No. 2, pp. 1279-1282, 1992.
- [4] M. Lindmayer, H. Stammberger. Application of numerical field simulations for low-voltage circuit breakers. IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology- Part A, Vol. 18, No. 3, pp. 708-717, 1995.
- [5] Femlab Electromagnetics module, Version 2.3. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- [6] Patentne prijave PCT/SI2005/000004 z dne 09.02.2005.
- [7] David J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, Prentice Hall 1999.
- [8] A.R. Sinigoj, ELMG polje, Ljubljana 1996.
- [9] B. Drnovšek, Diplomaska naloga, Ljubljana, 2005.
- [10] S. Klinc, Diplomaska naloga, Ljubljana, 2001.
- [11] M. Strehar, Inštalacijski odklopniki in njihove tehnične karakteristike, inštalacije, izdelki in oprema ter tehnologije, št. 01, 2000, stran 35-38.

Borut Drnovšek je diplomiral leta 2005 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot raziskovalec v podjetju ETI, d.d., Izlake in je študent podiplomskega študija elektrotehnike. Njegovo raziskovalno delo obsega področje elektromagnetike v elektromagnetnih sprožnikih.

Dejan Križaj je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, in dela kot pedagog pri predmetih Osnove elektrotehnike I in Osnove elektrotehnike II. Je vodja Laboratorija za bioelektromagnetiko, kjer se med drugim ukvarja z numerično simulacijo elektromagnetnih struktur. Zanima ga tudi vpliv elektromagnetnega polja na biološke sisteme, predvsem v zvezi z raziskavami bioimpedančnih metod in metod za manipulacijo bioloških celic.