

Detekcija napak v ferromagnetnih materialih z metodo vrtničnih tokov

Matic Markl, Henrik Lavrič, Klemen Drobnič, Danilo Makuc, Rastko Fišer

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: markl.matic@gmail.com

Fault detection in ferromagnetic materials by eddy current method

The paper presents development of a probe for eddy current testing of ferromagnetic materials. Multiple types of probes were tested with FEM analysis. All relevant parameters of the probe (geometrical and electrical) were evaluated and discussed. The same procedure was used also for evaluating probability of detecting the irregularity in material. In addition to simulations real probe was constructed, as well as auxiliary electric circuits and an user interface for controlling the examination procedure. Comparison between simulation and measurement results show good agreement and some further improvements of measuring systems were proposed.

1 Uvod

Metoda preiskovanja materialov z vrtničnimi toki je ena izmed mnogih metod, ki spadajo med neporušne preiskave NDT (Non-Destructive Testing). Neporušne se imenujejo zato, ker se vzorcu med preiskavo ne spremenijo lastnosti, kar pomeni, da je vzorec enako uporaben kot pred preiskavo. Materiale je možno preiskovati z magnetnimi delci, ultrazvokom, radiografijo, penetranti idr. Preiskave se opravljajo tako med samo proizvodnjo, kot tudi kasneje med obratovanjem. Vzorce, ki ne dosejajo zahtev po različnih standardih, se zavrže že med proizvodnjo, s čimer se doseže višja stopnja zanesljivosti končnega izdelka. Med obratovanjem je s pomočjo *on-line* preiskave vzorca možno spremljati njegovo obrabo, nastanek različnih razpok itd. ter tako povečati zanesljivost obratovanja in obenem napovedati morebitni remont. Če *on-line* spremljanje ni možno, se vzorec podvrže preiskavi na periodičnih pregledih. V strokovni literaturi se pogosto pojavi tudi kratica NDE (Non-Destructive Evaluation), ki je v bistvu nadpomenka za NDT. NDE zahteva pridobitev dodatnega geometrijskega parametra napake iz podatkov, pridobljenih v preiskavi, medtem ko NDT zahteva le potrditev, da gre za nepravilnost v vzorcu [1].

2 Princip delovanja preiskave

Za preiskavo z vrtničnimi toki je potrebno ustvariti časovno spreminjajoče magnetno polje, ki v prevodnem materialu inducira vrtnične toke. Ti toki povzročijo magnetno polje, ki po smeri nasprotuje vzbujaalnemu. Na mestu,

kjer je v materialu napaka, se inducira manj vrtničnih tokov in posledično je tudi manjše nasprotujoče magnetno polje. Z merjenjem inducirane napetosti v navitju sonde je možno odkriti rahlo deviacijo v skupnem magnetnem polju, ko je sonda nad napako [2]. Izmenično magnetno polje se vzbuja s konstantnim sinusnim tokom nizke frekvence skozi vzbujaalno navitje. Vdorna globina δ , ki jo izračunamo z $\delta = \sqrt{(\pi f \mu \sigma)^{-1}}$, je poleg frekvence f odvisna tudi od permeabilnosti μ in prevodnosti σ materiala. Pri preiskavi ferromagnetnih materialov je zaradi visoke relativne permeabilnosti zelo pomembno, da se uporablja nizka frekvenca, reda velikosti nekaj Hz. Ker se preiskuje ferromagnetni material, je potrebno paziti tudi na amplitudo vzbujaalnega toka, da magnetenje ne doseže nasičenja na BH -karakteristiki materiala. Po drugi strani pa mora biti ta tok dovolj velik, da v vzorcu inducira ustrezno količino vrtničnih tokov.

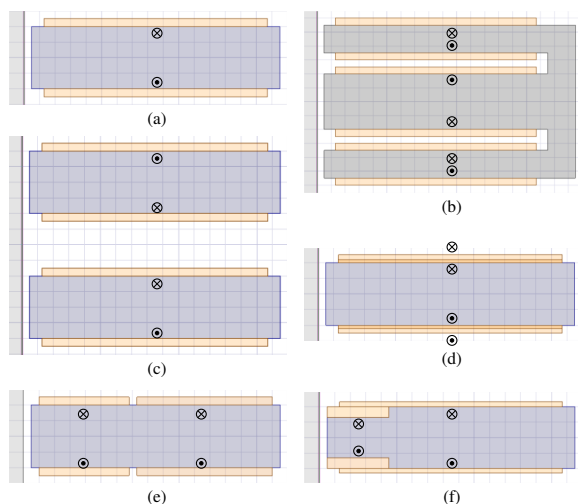
V članku je predstavljena metoda, po kateri se vzorec preiskuje po korakih, kar pomeni, da se meritve izvaja medtem ko sonda miruje. V vsaki točki sta zabeležena dva parametra detekcijske napetosti (amplituda in fazni kot glede na vsiljeni tok). Odkrivanje napake temelji na odklonu parametrov od povprečne vrednosti, ki nastopi, ko je sonda nad napako. S tako metodo ni potrebno določiti absolutne vrednosti parametrov napetosti ob napaki, ampak le mejno vrednost odklona parametrov od povprečne vrednosti. S tem se izniči vpliv spremembe permeabilnosti materiala.

Poleg beleženja parametrov detekcijske napetosti se sproti izračunavata tudi gradienta spreminjanja amplitude in faznega kota detekcijske napetosti. Majhen gradient predstavlja počasno spremembo teh dveh veličin skozi meritve. To je značilno za nehomogene materiale, kjer prevodnost in permeabilnost materiala nista enaki po vsem volumnu. Višji gradient pa predstavlja hitro spremembo razmer v materialu. Sem sodita približevanje sonde robu materiala ali pa približevanje napaki v materialu. Zaradi tega sta poleg samih potekov vrednosti parametrov detekcijske napetosti med preiskavami vedno prikazana tudi njuna gradienta.

3 Konstrukcija in evalvacija sonde v simulacijskem modelu

Za preiskovanje materialov z vrtničnimi toki se uporablja več različnih sond. Deliti jih je možno po izvedbi

(površinske, za izvrtine, za pregledovanje notranjih sten cevi, za pregledovanje palic) in po načinu delovanja (absolutne, diferencialne, refleksijske in hibridne) [3]. Zato je prvi korak konstrukcije sonde izbira pravilnega načina delovanja sonde. V ta namen je bil razvit 2D simulacijski model v programskem paketu Ansys Simplorer, ki temelji na metodi končnih elementov. Opravljenih je bilo več izračunov z različnimi sondami, ki so označene na sliki 1.



Slika 1: Sonde za izvajanje preiskav: (a) absolutna, (b) hibridna, (c) diferencialna, (d) refleksijska v2, (e) refleksijska v1, (f) refleksijska v3.

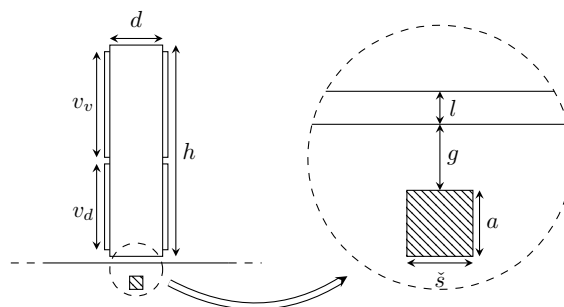
Vse različice sonde so bile napajane s konstantnim sinusnim tokovnim virom in na vseh je bila izmerjena inducirana napetost na navitju sonde. Da se lahko izvrši primerjava med različnimi tipi sond, je vse potrebno oceniti po enakem kriteriju. Izbran je bil kriterij SNR (Signal-to-noise ratio) [4]. Algoritem poišče največji odklon od povprečne vrednosti parametra detekcijske napetosti med meritvami, ki so zajete v okolici napake, in ga primerja z najvišjim odklonom od povprečne vrednosti med meritvami, ki so bile zajete daleč stran od napake. Razmerje SNR je bilo izračunano posebej za vsak parameter napetosti. Kot optimalna izbira glede na pridobljene rezultate (visok SNR) v tabeli 1 in enostavnost izdelave se je izkazala refleksijska sonda v1 (slika 1(e)). Značilnost refleksijske sonde je, da ima ločeno vzbujalno in detekcijsko navitje. To pomeni, da je možno vsako navitje posebej optimirati. Za vzbujalno navitje se lahko uporabi nekoliko debelejša žica, ki prevaja višji tok, detekcijsko navitje pa je navito z zelo tanko žico. S tem lahko na enaki površini naredimo več ovojjev, kar zviša inducirano napetost v detekcijskem navitju. Čeprav je hibridna sonda v simulacijah pokazala veliko višje vrednosti SNR , je bila izbrana refleksijska sonda v1, ker le-ta povzroči veliko ožji odklon (indikacijo) ob napaki. Prednost ožje indikacije je predvsem v primerih, ko je več manjših napak na majhni medsebojni razdalji.

Ko je bila izbrana osnovna postavitev navitij v sondi, je bilo potrebno preveriti še vplive vseh parametrov sonde na uspešnost detekcije napake. Poleg geometrijskih para-

Tabela 1: Primerjava SNR gradienta osnovnega signala.

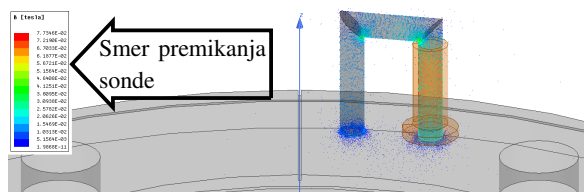
	Abs.	Dif.	Ref v1.	Ref v2.	Ref v3.	Hib.
SNR_{amp}	83	36	196	56	159	87
SNR_{θ}	10	38	21	1	22	110

metrov, označenih na sliki 2, so bili preverjeni še vplivi amplitude in frekvence vzbujalnega toka, števila ovojev posameznih navitij, permeabilnosti vzorca in jedra sonde ter oblike jedra sonde.

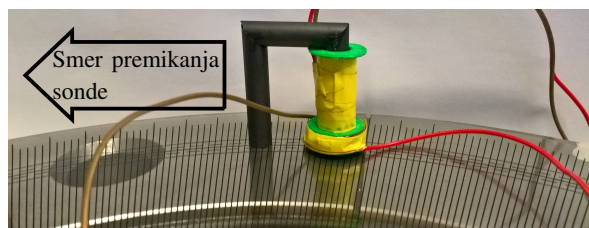


Slika 2: Geometrijski parametri sonde in merjenja.

Za izračun vplivov vsakega posameznega parametra sonde je bilo izvedenih mnogo simulacij. V vsaki izmed njih se je naenkrat spremenil le en parameter, preostali pa so imeli nespremenjene privzete vrednosti. Ker je bilo v tem koraku potrebno le preveriti trend SNR , ki ga povzroči posamezen parameter, je bila večina simulacij izvedenih v 2D modelu (npr. če se globina napake prepolovi, se SNR_{amp} ne spremeni, SNR_{θ} pa pade za približno 30%). Vplivi vsakega posameznega parametra so predstavljeni v [4]. Absolutne vrednosti napetosti v 2D simulacijah niso enake tistim na realnem modelu, zato jih je potrebno pomnožiti s prilagoditvenim faktorjem. Največja prednost 2D simulacij je, da so zelo hitre pri izračunih, kar omogoči večje število preverjenih parametrov v enakem časovnem obdobju. Za vse parametre ni bilo možno preveriti trendov v 2D kartezičnem koordinatnem sistemu, zato je bilo nekaj izračunov izvedenih tudi v valjnem koordinatnem sistemu. V zaključni fazi simulacijskega procesa je bil narejen tudi 3D model, ki omogoča pregled trendov, ki jih ni možno preveriti v 2D simulacijah, primerjavo simulacijskih izračunov z meritvami in nenazadnje sledljivost rezultatov od meritev vse do 2D modela. Slika 3 predstavlja končni simulacijski model. Končna oblika sonde, ki je bila predlagana v simulacijah, je bila tudi fizično izdelana in je prikazana na sliki 4.



Slika 3: Simulacijski model sonde za preiskovanje feromagnetnega diska.



Slika 4: Izdelana sonda za preiskovanje feromagnetnega diska.

4 Meritve na realnem vzorcu

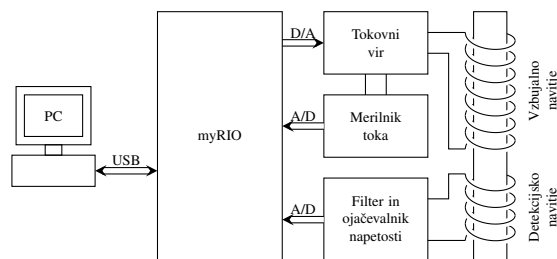
4.1 Merilni sistem

Za praktično opravljanje meritev je bilo potrebno konstruirati poleg same sonde tudi vsa pomožna električna vezja, ki so skrbela za napajanje in merjenje električnih veličin na sondi. Izdelan je bil konstantni sinusni tokovni vir v vezju izboljšane Howlandove vezave, ojačevalnik detekcijske napetosti skupaj z nizkoprepustnim filtrom ter merilnik toka. Pri konstrukciji napajalnika je zelo pomembno, da ta v vzbujalno navitje pošilja tok s čim manj višjimi harmoniki. Ti povzročajo težave pri izračunu faznega kota sinusnega signala, ki je pomemben za detekcijo napake v vzorcu. Tudi vezji za zajemanje električnega toka in napetosti morata signal dobro filtrirati, da je izračun faznega kota čim bolj natančen. Sprememba faznega kota ob napaki v vzorcu se meri v desetinkah kotnih stopinj, sprememba amplitude detekcijske napetosti pa v milivoltih.

Krmiljenje tokovnega vira in zajem električnih veličin je naloga algoritma v programskem paketu LabVIEW. Računalniški program zajema časovne poteke vzbujalnega toka in detekcijske napetosti ter iz njiju izračunava amplitudi ter fazni kot med njima. Za izračun amplitudne vrednosti program izračuna efektivno vrednost, katero pomnoži s $\sqrt{2}$, za izračun faznega kota pa uporablja Fourierovo vrsto. Poleg osnovnih parametrov algoritem izračunava še njuna gradienta. Izdelan je bil tudi celoten uporabniški vmesnik, preko katerega se lahko spreminja parametre vzbujalnega toka. Program v realnem času prikazuje rezultate meritev, iz katerih je možno razbrati, ali se pod sondo nahaja napaka. Komunikacija s pomožnimi vezji poteka skozi razvojno ploščo myRIO. Na razvojni plošči so uporabljeni en digitalno-analogni pretvornik kot izhod ter dva analogno-digitalna pretvornika kot vhoda. Pretvorniki delujejo na območju ± 10 V z 12-bitno ločljivostjo [5]. To pomeni, da je napetost na vhodu možno odčitati/nastaviti z ločljivostjo 4,9 mV. Zaradi tega so bili v pomožnih vezjih uporabljeni ojačevalniki z visokim faktorjem ojačanja, da je bilo možno izmeriti tako majhne razlike v parametrih detekcijske napetosti. Na sliki 5 je prikazana celotna shema povezave merilnih instrumentov.

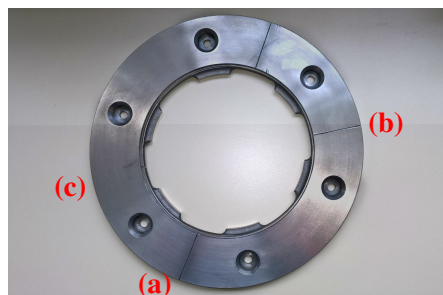
4.2 Testni vzorec

Pri meritvah je bil kot vzorec uporabljen zavorni disk iz sive litine, na katerem so bile namerno povzročene tri napake. Disk je bil zarezan z žago na površini do globine 2 in 4 mm ter z zadnje strani do 2 mm pod površino. Tako



Slika 5: Shema postavitve merilnih instrumentov.

sta bili umetno narejeni dve površinski in ena napaka pod površino. Sonda se je po površini vzorca pomikala tako, da je bila razdalja med merilnima mestoma 2 mm. Smeri premikanja sonde sta označeni že na slikah 3 in 4. Kot je razvidno s teh dveh slik, napako naprej prečka steber sonde, ki ne nosi navitja in nato še steber, ki nosi navitje.



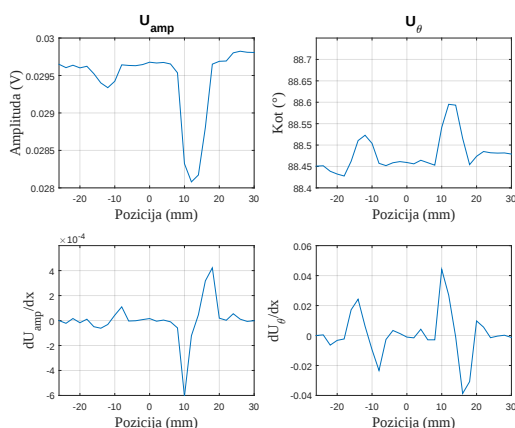
Slika 6: Zavorni disk z napakami kot vzorec za preskušanje: (a) površinska 2 mm, (b) površinska 4 mm, (c) 2 mm pod površino.

5 Primerjava meritev in simulacijskih izračunov

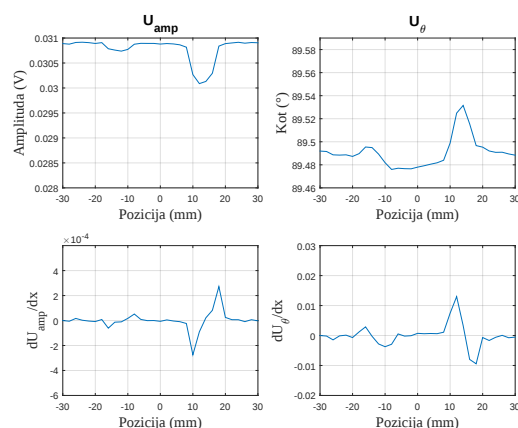
5.1 Rezultati meritev

Na sliki 7 sta prikazana poteka parametrov ob pregledu vzorca s sondo. V prvi vrstici grafa prikazujeta izračunana parametra detekcijske napetosti, druga vrstica pa pripadajoče gradiente. V levem stolpcu sta prikazana poteka amplitude detekcijske napetosti, desna pa potek faznega kota. Odsklon od povprečne vrednosti (indikacijo) se lahko opazi kot znižanje amplitude in povišanje faznega kota detekcijske napetosti. Levo indikacijo na vseh štirih grafih povzroči prehod stebra sonde brez navitja čez napako. Desno, večjo indikacijo, pa povzroči prehod stebra sonde, ki nosi detekcijsko navitje. Oba odklona sta na grafih za 12 mm oddaljena od središča, saj je koordinatno izhodišče točno na sredini napake. Indikaciji se pojavita izmaknjeni za točno toliko, kolikor znaša vsota polovice razdalje med stebroma in radija stebra.

Enaki meritvi sta bili opravljeni tudi na ostalih dveh poškodbah na disku. Absolutne vrednosti maksimalnega odklona posameznega parametra od povprečne vrednosti so podane v tabeli 2. Opazno je, da je sprememba amplitude pri obeh napakah na površini enaka, ne glede na globino napake. Razlika je le v odklonu faznega kota. Iz



Slika 7: Spreminjanje parametrov napetosti ob napaki na površini globine 2 mm - meritev



Slika 8: Spreminjanje parametrov napetosti ob napaki na površini globine 2 mm - simulacija

tega lahko zaključimo, da je globino napake možno oceniti na podlagi spremembe v faznem kotu. Pri dvakratni globini napake je odklon faznega kota približno dvakrat večji. Pri meritvi spremembe amplitude nad napako, ki je pod površino, pa se odklon v amplitudi prepolovi. V tem primeru se je bolje zanesti na spremembo v faznem kotu, saj je ta večja. Ta je skoraj enaka tisti pri 4 mm globoki napaki na površini.

Tabela 2: Sprememba amplitude in faznega kota ob napaki - meritev

	ΔU_{amp} [mV]	ΔU_{θ} [°]
napaka na površini (2 mm)	-1.5	+0.12
napaka na površini (4 mm)	-1.5	+0.20
napaka 2 mm pod površino	-0.8	+0.17

5.2 Simulacijski izračuni

Z namenom primerjave simulacijskih rezultatov s tistimi, pridobljenimi na praktičnem modelu, je bil narejen simulacijski model, ki kar najbolj posnema realne razmere. Model je izveden v 3D prostoru. Na tem modelu so bile preskušane enake napake kot pri meritvah. Da sta poteka parametrov podobna, kaže slika 8. Glede na meritve je opazno, da je povprečna vrednost amplitude nekoliko višja. Do razlike pride zaradi nepoznavanja natančne vrednosti permeabilnosti materiala. Višja permeabilnost v simulacijskem modelu rezultira v navzgor premaknjeni karakteristiki. Tudi med potekom faznega kota obstaja razlika med povprečnima vrednostima parametra. Ta razlika nastane zaradi filtra, ki je na vходу merilnika detekcijske napetosti.

Absolutne vrednosti odklonov od povprečne vrednosti za oba parametra detekcijske napetosti so bile v simulacijah nekoliko manjše za vse tri napake. To je posledica žaganja materiala in tako lokalno spremenjene (znižane) permeabilnosti v okolici napake na zavornem disku. Ob pregledu razmerij med rezultati, pridobljenimi z meritvami in izračuni, pa lahko zaključimo, da se rezultati skladajo. Tako je tudi v simulacijskem modelu ob dvakrat globlji površinski napaki odklon faznega kota približno dvakrat večji.

6 Zaključek

Metoda z vrtničnimi toki ne more povsem nadomestiti drugih metod neporušnega testiranja, lahko pa jih odlično dopolnjuje. Ena izmed največjih prednosti te metode je predvsem velika možnost avtomatizacije. Metoda predvideva zaznavo indikacije napake z električnim signalom. Zaradi tega je možno izvajanje preiskav prepustiti mikrokrmilniku.

Izbira parametra napetosti, po katerem je zaznava napak zanesljivejša, je odvisna od vrste napak, ki jih poskušamo odkriti. Pri površinskih napakah se je smiselno v večji meri zanesti prav na parameter amplitude, pri napakah pod površino pa na parameter faznega kota. V splošnem je seveda potrebno opazovati in ustrezno reagirati na oba parametra.

Dosedanje delo dokazuje, da je detekcija napak z vrtničnimi toki možna. Sistem zaenkrat deluje v laboratorijskih razmerah, kjer je relativno malo motenj. Za praktično uporabo sistema je sondo in vezja najprej potrebno nadgraditi glede robustnosti. K aplikaciji te metode bi zelo pripomogla tudi avtomatizacija premikanja sonde po površini vzorca in programsko prepoznavanje napak na vzorcu. Sem sodi razširitev algoritma, ki bi izračunaval geometrijske razsežnosti napak.

Literatura

- [1] J. Prasad and C. Gouri Krishnadas Nair: Non-Destructive Test And Evaluation Of Materials, Tata McGraw-Hill, 2009.
- [2] J. García-Martín, J. Gómez-Gil in E. Vázquez-Sánchez: Non-destructive techniques based on eddy current testing, Sensors, vol. 11, no. 3, 2011, pp. 2525-2565.
- [3] Iowa State University, Center for NDE: ECT NDT Course Material, Dosegljivo: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm, Dostopano: 9.10.2017.
- [4] M. Markl: Detekcija napak v feromagnetnih materialih z metodo vrtničnih tokov, Magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2018.
- [5] National Instruments: User guide and specifications, NI myRIO-1900, Datasheet, 2016.