

NEDEŠTRUKTÍVNA KONTROLA MATERIÁLOV METÓDOU VÍRIVÝCH PRÚDOV MATERIAL NONDESTRUCTIVE EVALUATION BY EDDY CURRENT TESTING

Tomáš Marek

Katedra teoretickej a aplikovanej elektrotechniky, Elektrotechnická fakulta ŽU v Žiline
Veľký diel, 010 26 Žilina, Slovenská republika, email: marek@fel.utc.sk

Abstrakt Metóda vírivých prúdov je jedna z množstva metód nedeštruktívnej kontroly materiálov. Hlavným cieľom nedeštruktívnej kontroly je prevencia porúch zariadení bez vplyvu na chod samotného zariadenia. A to porúch zapríčinených skrytým defektom materiálu, z ktorého je zariadenie alebo časť zariadenia zhotovené. Článok sa zameriava na objasnenie základných princípov metódy a prezentuje jej funkčnosť prostredníctvom simulácie.

Summary Eddy current method is one of many methods of nondestructive testing. The aim of nondestructive testing is prevention of equipment breakdown without any impact on equipment operation. Especially breakdowns caused by hidden material defect from which is equipment or part of equipment made. This paper explains the basic principles of method and presents its functionality by simulation.

1. ÚVOD

Pod pojmom nedeštruktívna kontrola materiálov rozumieme metódu zisťovania skrytých porúch a poškodení materiálov alebo merania charakteristík objektov, ktorá však pozorované materiály alebo objekty nijako neovplyvňuje.

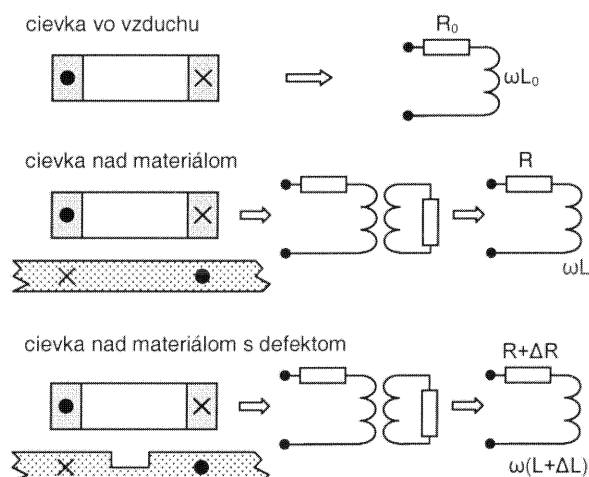
Na nedeštruktívnu kontrolu sa používa viacero metód. Sú to napríklad najjednoduchšie vizuálne kontroly, kontroly založené na penetrácii špeciálnych kvapalín, metódy využívajúce feromagnetický prášok a magnetické pole, metódy skenovania röntgenom alebo ultrazvukom a rôzne metódy využívajúce elektromagnetické pole. Medzi elektromagnetické metódy možno zaradiť metódu rozptylu magnetického toku MFL (magnetic flux leakage), metódu vírivých prúdov EC (eddy current) a príbuznú metódu vírivých prúdov vo vzdialenom poli RFEC (remote field eddy current). Voľba najvhodnejšej metódy je závislá od materiálu kontrolovaného objektu a samozrejme aj od tvaru a dostupnosti objektu.

2. METÓDA VÍRIVÝCH PRÚDOV

2.1 Základný popis

Principiálne je metóda založená na meraní vplyvov indukovaných vírivých prúdov v skúmanom materiáli, na elektromagnetické pole v okolí materiálu.

Elektromagnetické pole sa vytvára budiacou cievkou (exciter), ktorá je napájaná harmonickým napätím. Vytvorené elektromagnetické pole je tlmené a deformované materiálom, v ktorom sa indukujú vírivé prúdy. Celá situácia predstavuje indukčne viazaný obvod a dá sa popísať elektronickou náhradnou schémou (viď obr.1), [1], [2].



Obr.1 Konfigurácie budiacej cievky a príslušné náhradné schémy

Fig1. Configurations of excitation coil and particular alternate designs

Ak sa v materiáli nachádza nejaká trhlinka alebo defekt, zmení sa veľkosť v ňom indukovaných vírivých prúdov a tým pádom sa zmení aj veľkosť elektromagnetického poľa v okolí cievky. V náhradnej schéme sa to prejaví v zmene indukčnosti ΔL a odporu ΔR na sekundárnej strane obvodu (obr.1) [2].

2.2 Spôsob merania

Na kontrolu materiálov pomocou metódy vírivých prúdov sa používajú rôzne konštruované sondy. Jedna z možností kontroly je založená na priamom meraní zmeny impedancie budiacej cievky, pri pohybe sondy nad materiálom. Meranie zmeny impedancie sa realizuje zapojením sondy do mostíka. Prechod cievky nad defektom sa prejaví, ako pohyb pracovného bodu impedancie po

uzatvorenej krivke v komplexnej rovine. Podľa veľkosti a tvaru krivky možno potom určiť typ a rozsah defektu [1], [2].

Meracia sonda pozostávajúca len z jednej cievky sa nazýva absolútna sonda. Modifikáciou absolútnej sondy dostávame sondu diferenčnú, ktorá je zhotovená po elektrickej stránke ako dve do série zapojené cievky, ktoré slúžia na budenie aj meranie súčasne. Fyzicky sú cievky vinuté opačne a umiestnené vedľa seba nad materiálom oddelené úzkou medzerou. Nameraná impedancia tvorí uzatvorenú symetrickú krivku okolo strednej hodnoty v komplexnej rovine [2], [3].

Druhá metóda kontroly materiálov pomocou vírivých prúdov, používa dve alebo viac nezávislých cievok, z ktorých sa skladá meracia sonda. Kde jedna cievka vždy slúži len ako budiaca (exciter) a ďalšia cievka, resp. cievky sú použité na meranie elektromagnetického poľa (pickup cievky). Sonda sa nazýva reflexná alebo hybridná, ak je meracích cievok viac a ako výstupná veličina sa meria hodnota indukovaného napätia, resp. rozdiel indukovaných napätí. Výhoda reflexnej sondy je, že budiaca cievka môže byť mohutná a tým umožňuje generovať silné a uniformné pole (čo zabezpečí väčšiu penetráciu materiálu), zatiaľ čo meracia cievka môže mať malé rozmery a tým je citlivá na malé defekty. Ďalšou výhodou je, že sonda sa nemusí zapájať do mostíka, teda dá sa použiť v širokom spektre budiacich frekvencií.

Ak je os cievky kolmá na rovinu materiálu, hovoríme o tzv. povrchovej sonde (obr. 1).

Iný spôsob umiestnenia budiacej a meracej cievky je, že os cievky je rovnobežná s materiálom a celá sonda je osovo symetrická. Takáto konfigurácia sa používa na skúmanie potrubí alebo okrúhlych dier. Rozlišujeme sondy, ktoré sa pohybujú vo vnútri potrubia, nazývajú sa ID sondy tzv. sondy s bobinovou excitáciou (realizujú sa ako absolútne alebo diferenčné) alebo sondy pohybujúce sa okolo potrubia z vonkajšej strany, ktoré sa nazývajú OD sondy [3].

3. REALIZÁCIA SIMULÁCIÍ

3.1 Základné teoretické poznatky

Pre simulovanie skúmania materiálu metódou vírivých prúdov je nutné v prvom rade uvedomiť si, o aký problém z hľadiska teoretickej elektrotechniky ide. Budiaca cievka je napájaná harmonickým prúdom a zaujíma nás elektromagnetické pole vo vodivom prostredí, kde vznikajú vírivé prúdy. Teda vodivý prúd bude určite väčší ako posuvný $\partial \vec{D} / \partial t$, ktorý je možné pri výpočtoch zanedbať. Z toho vyplýva, že sa jedná o pole kvázistacionárne. Maxwellove rovnice môžeme písať v tvare.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4)$$

V kvázistacionárnom poli platia všetky materiálové a energetické rovnice [4], [5]. Rovnica kontinuity elektrického prúdu však v dôsledku zanedbania posuvného prúdu nadobúda tvar.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5)$$

Keďže pre magnetickú zložku poľa platí rovnica (3), je možné poľu vektora \vec{B} priradiť pole vektorovej veličiny \vec{A} , teda vektorový magnetický potenciál.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

V kvázistacionárnom poli je možné ďalej dosadením rovnice (6) do rovnice (2) a upravením, zaviesť podobnou úvahou ako v statickom poli, skalárny elektrický potenciál V . Potom vzťah pre výpočet vektora elektrickej intenzity z potenciálov nadobúda tvar

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (7)$$

Podrobnejšie odvodenia možno nájsť v [4], [5].

3.2 Simulácia vo FEMLABE

Na simuláciu elektromagnetického poľa bola použitá programová nadstavba MatLabu FEMLab [6]. Ide o nástroj umožňujúci realizovať okrem iných aj simulácie elektromagnetického kvázistacionárneho poľa v 2D alebo 3D priestore.

Na riešenie sú použité dve formulácie vzťahov. Formulácia cez magnetické pole, kde je riešený vektor magnetickej intenzity \vec{H} . A formulácia cez vektorový magnetický potenciál \vec{A} , ktorý sa používa pri skúmaní vírivých prúdov, resp. indukovanej prúdovej hustoty.

Odvodenie hlavnej výpočtovej rovnice vychádza z potenciálových vzťahov (6), (7) a zovšeobecnených materiálových rovníc

$$\vec{B} = \mu \cdot (\vec{H} + \vec{M}), \quad (8)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{J}^e, \quad (9)$$

kde μ je permeabilita a σ merná vodivosť prostredia a \vec{J}^e je vektor externej (zvonka dodávanej) prúdovej hustoty. Vo vzťahu (9) navyše

figuruje aj časť vektora elektrickej intenzity, vyvolanej vplyvom pohybu telesa vektorom rýchlosti \vec{v} . Následne dosadením rovnice (9) do rovnice (1) dostávame

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + \vec{J}^e, \quad (10)$$

do ktorej keď dosadíme rovnice (8), (6) a (7) dostaneme vzťah.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} - \vec{M} \right) = \sigma \cdot \left[-\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) \right] + \vec{J}^e \quad (11)$$

Z rovnice kontinuity (5) po dosadení rovnice (9) a oboch potenciálových rovníc (6) a (7) dostávame

$$-\nabla \cdot \left[\sigma \cdot \left(\nabla V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) - \sigma \cdot \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) - \vec{J}^e \right] = 0. \quad (12)$$

Keďže budenie cievok a teda aj polia budú časovo harmonické, je možné rovnice (11) a (12) upraviť na

$$j\omega\sigma\vec{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \vec{M} \right) - \sigma\vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) + \sigma\nabla V = \vec{J}^e, \quad (13)$$

$$-\nabla \cdot (j\omega\sigma\vec{A} - \sigma\vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) + \sigma\nabla V - \vec{J}^e) = 0. \quad (14)$$

Potenciály \vec{A} a V nie sú však jednoznačne určené rovnicami (13) a (14). Riešeniu \vec{A} a V zodpovedajú aj polia

$$\vec{\tilde{A}} = \vec{A} + \nabla\psi, \quad (15)$$

$$\vec{\tilde{V}} = V - j\omega\psi, \quad (16)$$

kde skalárna funkcia ψ vyhovuje okrajovým podmienkam aj rovnicam (13), (14). Ide o tzv. kalibračnú transformáciu [5]. Na redukovanie systému rovníc, použijeme substitúciu, [6]

$$\psi = -\frac{jV}{\omega}, \quad (17)$$

ktorú keď dosadíme do (15) a (16), tak kalibrovaný elektrický potenciál bude rovný nule a kalibrovaný vektorový magnetický potenciál bude rovný, [6]

$$\vec{\tilde{A}} = \vec{A} - \frac{j}{\omega} \nabla V. \quad (18)$$

Po redukovani rovníc, stačí pre výpočet použiť už iba rovnicu (13), ktorá bude mať tvar.

$$j\omega\sigma\vec{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \vec{M} \right) - \sigma\vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}^e. \quad (19)$$

Na simulovanie jednoduchších prípadov, ktoré sú osovo súmerné, je možné použiť špeciálny 2D model FEMLabu s označením „qaa_th“ (azimuthal currents quasi-statics, time harmonics).

Pri kreslení simulovaného problému je nutné brať do úvahy, že os súmernosti (z) je totožná s osou y a vzdialenosť od osi (r) je zhodná s x pracovnej plochy. Zložky vektorov uhla φ sú kolmé na obrazovku. Zredukované sú aj vektory polí v základnej rovnici (19). Vektor magnetického potenciálu \vec{A} a vektor externej prúdovej hustoty \vec{J}^e sa uvažujú len ako zložky v smere φ . Vektory \vec{M} a \vec{v} sa naopak zadávajú ako zložky v osiach z , r . Výsledok riešenia modelu je pole zložky φ magnetického potenciálu - A_φ . Preto aj ostatné riešené veličiny elektromagnetického poľa obsahujú len niektoré zložky, buď sú to zložky v smere φ (napr. J_φ , E_φ , D_φ), alebo zložky v smere r a z (napr. H_r , H_z , B_r , B_z). Popísané obmedzenie však nie je podstatné z hľadiska uvažovaného zjednodušenia, lebo len pri dodržaní osovej súmernosti objektov možno považovať výsledky za vierohodné.

Ďalší krok pri príprave simulácie je určenie okrajových podmienok. FEMLab ponúka viac možností nastavenia okrajových podmienok (viac v [6]).

Potom sa určia parametre jednotlivých prostredí a nastaví sa zdroje prúdov.

Posledná fáza prípravy simulácie je vytvorenie siete, potrebnej pre numerický výpočet. Výpočet je realizovaný metódou konečných prvkov [7].

Po úspešnom vypočítaní možno graficky alebo číselne ďalej spracovávať výsledky simulácie, čo znamená vytvárať grafické výstupy pre konkrétne zložky poľa alebo robiť merania v určitej časti pracovnej plochy.

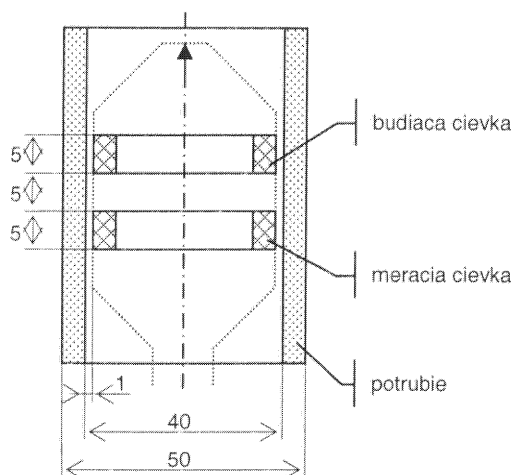
4. VÝSLEDKY SIMULÁCIE

Na vytvorenie jednoduchého príkladu som použil situáciu popísanú obrázkom (obr.2).

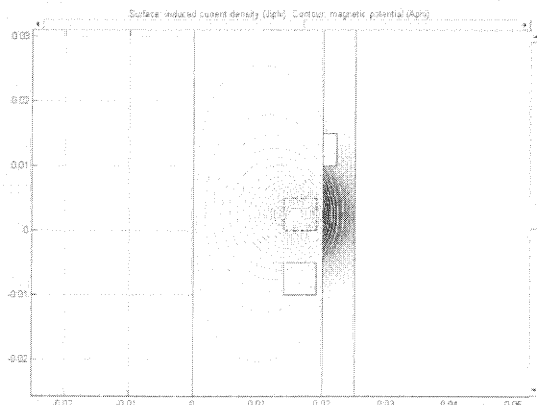
Kontroluje sa potrubie zhotovené z vodivého materiálu s mernou vodivosťou $\sigma = 2e6$ S/m. Na meranie je použitá ID reflexná sonda s jednou budiacou a jednou detekčnou cievkou. Externá prúdová hustota budiacej cievky je prerátaná vzhľadom na prierez cievky z celkového prúdu $I = 0,5$ A, pri frekvencii $f = 20$ kHz.

Celá situácia zostrojená vo FEMLabu je na obr.3. Pri simulácii osovo súmerného problému, ako je vidieť na obrázku, sa kreslí len v kladnej polrovine r a os súmernosti sa nastaví ako špeciálny typ okraju (okrajovej podmienky). Prostredie na vnútornej aj na vonkajšej strane potrubia je vzduch. Do výpočtov je už zahrnutý aj defekt. Jedná sa

o trhlínu z vnútornej strany potrubia o hĺbke 2 mm (t.j. 40%) a dĺžke 5 mm. Keďže defekt musí byť taktiež osovo súmerný, v skutočnosti ide o súvislú vzduchovú medzeru okolo celého potrubia. Môže to byť napr. defekt pod zvarom alebo iným spojom potrubia.



Obr.2 Simulovaná úloha
Fig.2 Simulated problem



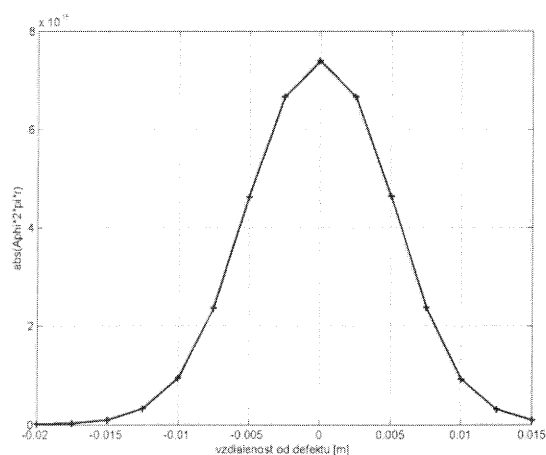
Obr.3 Simulovaná úloha zostavená a vypočítaná vo FEMLabe, kontúrami je zobrazená veľkosť magnetického potenciálu A_ϕ , odtieňmi šedej je možné vidieť veľkosť indukovanej prúdovej hustoty v stene potrubia

Fig.3 Simulated problem arranged and solved in FEMLab, contours shows value of magnetic potential A_ϕ , greyscale shows value of induced current density in tube wall

Na obr.3 je znázornený už aj výsledný tvar poľa v okolí budiacej cievky, ako aj naindukovaná prúdová hustota v stene potrubia.

Simulácia bola vykonaná v 15 krokoch s posunom sondy po 2,5 mm v axiálnom smere nahor. Výsledky ukazujú ako sa sonda približuje a následne vzdďľuje od defektu. Na interpretovanie

výsledkov bola použitá hodnota indukovaného napätia prepočítaná z výsledného magnetického potenciálu A_ϕ . Aby bol vylúčený vplyv použitej siete, simuluje sa aj meranie bez defektu, pričom získané napätie považujeme za referenčnú hodnotu. Výsledné hodnoty sú vypočítané ako rozdiel hodnoty napätia získaného v situácii podľa obr.6 s defektom a referenčnej hodnoty zo simulovanej situácie bez defektu. Keďže výsledné hodnoty napätia (rozdielové hodnoty) sú komplexné čísla, je ich možné interpretovať rôznymi spôsobmi. Najčastejšie sa však používajú dve základné charakteristiky.

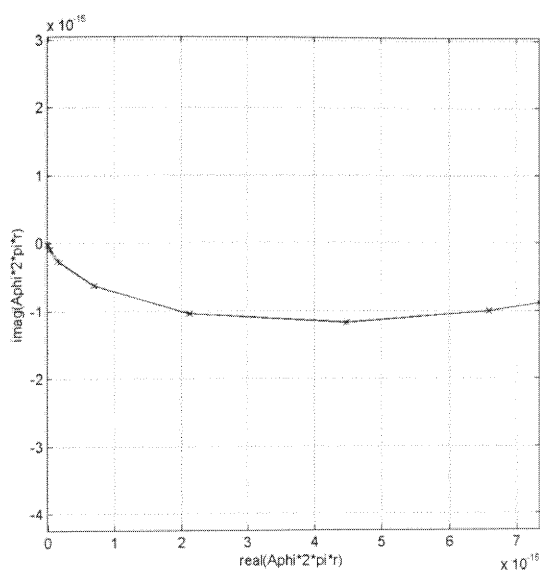


Obr.4 Závislosť absolútnej hodnoty rozdielového napätia od polohy defektu voči meracej sonde

Fig.4 Dependence of absolute value of differential voltage and defect position toward pickup coil

Jednou je zobrazenie absolútnej hodnoty napätia v závislosti od polohy defektu voči meracej sonde (obr.4). Zo závislosti je jednoznačne zrejmé, že signál nadobúda maximálnu hodnotu pri polohe cievky nad stredom defektu.

Druhá charakteristika je na obr.5, kde sú zobrazené jednotlivé body rozdielových napätí v komplexnej rovine. Pracovný bod napätia sa pohybuje po uzavretej krivke, ktorej počiatkový a koncový bod zodpovedá situácii, keď je meraná iba referenčná hodnota napätia, t.j. rozdielová hodnota napätia je nulová. Krivka má tvar oblúka s okrajmi od nulovej hodnoty rozdielového napätia až po maximálnu hodnotu napätia, ktorú predstavuje maximálna hodnota reálnej zložky. Pohyb späť, teda vzdďľovanie sa detekčnej cievky od defektu, je takmer po zhodnej krivke smerom do bodu s nulovou hodnotou rozdielového napätia.



Obr.5 Zobrazenie polohy rozdielového napätia v komplexnej rovine (Lissajousov obrazec)

Fig.5 Plotting of differential voltage in complex plane (Lissajouse figure)

5. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Simulácia spracovaná v článku prezentuje jednoduchý osovo symetrický problém. Použitie reflexnej sondy dovoľuje jednoduché meranie poľa a prehľadné prezentovanie nameraných výsledkov.

Významný parameter simulácie je zvolená frekvencia prúdu v budiacej cievke, pretože frekvencia ovplyvňuje ekvivalentnú hĺbku vniku. Z toho dôvodu je dôležité zvoliť správnu hodnotu

frekvencie podľa hrúbky a typu skúmaného materiálu a podľa hĺbky a charakteru defektu.

Namerané charakteristiky jednoznačne ukazujú funkčnosť a použiteľnosť metódy vírivých prúdov v nedeštruktívnej kontrole materiálov

Pre skúmanie lokálnych trhlín, ktoré nie sú symetrické okolo celého obvodu potrubia, alebo pre použitie napr. povrchových sond sa zvoli simulčný model v 3D.

LITERATÚRA

- [1] ČÁPOVÁ,K.,ČÁP,I.,FAKTOROVÁ,D.: Electromagnetic phenomena as the principles of material nondestructive evaluation, In: ADVANCES 3/2004, Žilina
- [2] YUSHI SUN: An introduction to electromagnetic nondestructing testing, Electromagnetic nondestructive evaluation (I), IOS Press, 1998
- [3] <http://www.ndt-ed.org/>, pristupované dňa 21.1.2005
- [4] NEVESELÝ,M.: Teoretická elektrotechnika III/2, VŠDS Žilina , 1995
- [5] NEVESELÝ,M.: Teoretická elektrotechnika IV, VŠDS Žilina , 1995
- [6] FEMLAB Electromagnetics Module v 2.3, CONSOLAB, 2002
- [7] MAYER,D., POLÁK,J.: Metody řešení elektrických a magnetických polí, Alfa Praha, 1983