

Jaromír PIŠTORA *, Michal LESŇÁK **

MODELOVÁNÍ A KONSTRUKCE MAGNETICKÉHO DEFEKTOSKOPU OCELOVÝCH LAN NOVÉ GENERACE

NEW GENERATION MAGNETIC DEFECTOSCOPE OF STEEL ROPES
– MODELLING AND CONSTRUCTION

Abstract

The paper is oriented on modelling, construction and testing of new magnetic defectoscope based on three channel sensing. The corrosion and breakage channels are added by the magnetic youke for microdefect inspection. The basic aim of this sensing unit is the specification of defects (cracks, etc.) with axial geometry less than 500 micrometers. These imperfections generate the ambient magnetic field with gradients which are practically nondetectable by now used magnetic sensing circuits.

Abstrakt

Příspěvek je věnován modelování, konstrukci a testování nového typu magnetického defektoskopu, který vychází z tříkanálového principu detekce. Ke standardně používaným měřicím kanálům koroze a zlomů byl zařazen třetí snímací magnetický obvod pro specifikaci mikrodefektů. Úkolem tohoto senzoru je detekovat poruchy (trhliny, praskliny, atd.) s axiálními rozměry menšími než 500 mikrometrů. Poruchy těchto geometrií generují rozptylová magnetická pole s takovými gradienty, že je nelze spolehlivě specifikovat dosud užívanými snímacími magnetickými jhy.

Klíčová slova: electromagnetic field modelling, magnetic measurements, sensors, nondestructive testing.

Úvod

Fyzikálním principem magnetické defektoskopie je analýza magnetického pole, které je generováno zmagnetovaným tělesem. Jakákoliv porucha a deformace zmagnetovaného tělesa amplitudově moduluje rozložení magnetického pole v okolí diagnostikovaného předmětu [1]. Skalární a vektorová pole magneticky buzených těles lze specifikovat pomocí rozsáhlé škály snímačů [2]. V praxi se začínají aplikovat magnetické sensory diferenciálního typu [3], konstruuji se elementy pro dvoudimenzionální testování [4], velký pokrok byl zaznamenán u SQUID senzorů [5, 6], nové možnosti přináší využití ultrazvuku [7]. Velká pozornost je v posledních letech věnována magnetooptickému záznamu [8]. Nepřehlédnutelné jsou rozsáhlé aktivity amerických, japonských a evropských vědeckovýzkumných pracovišť zaměřené na výzkum technologií pro přípravu nových magnetických materiálů a struktur [9, 10]. Cílem magnetické defektoskopie je maximálně přesné určení typu a velikosti poruch diagnostikovaného tělesa, případně studium geneze těchto defektů. Za tímto účelem se rozvíjejí netradiční modelové přístupy pro interpretaci signálu a řešení inverzních úloh [11]. Nemalá pozornost je věnována i problematice polohové geometrie permanentních magnetů pro generaci magnetického pole [12].

Bázi příspěvku tvoří dvě hlavní části. První, teoretická, je věnována výsledkům modelování distribuce elektromagnetických polí v magnetickém defektoskopu. Druhá, konstrukční, vychází z modelových presumpcí a předkládá výsledky konstrukce a realizace jednotlivých partií nedestruktivní diagnostické jednotky nové generace typu REMAT [13, 14].

* Prof. Ing., CSc., Institut fyziky HGF VŠB – TUO, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, jaromir.pistora@vsb.cz,

** Doc. Dr. Ing., Institut fyziky HGF VŠB – TUO, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, michal.lesnak@vsb.cz

Modelování prvků magnetického defektoskopu

Výpočty rozložení elektromagnetických polí v jednotlivých elementech magnetického defektoskopu byly realizovány metodou konečných prvků v softwarovém prostředí ANSYS [15]. Hlavní pozornost byla orientována na popis distribuce magnetických toků v magnetizační hlavě a v sensorových obvodech korpusu snímačů. Vlastní fyzikální řešení vychází z výpočtů vektorových a skalárních potenciálů a jejich transformace do příslušných hodnot magnetické indukce.

Fyzikální princip řešení

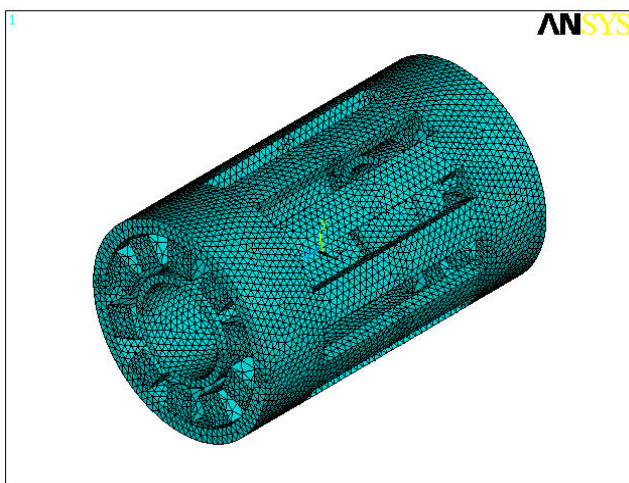
Fyzikální bází je řešení Maxwellových rovnic pro elektromagnetické potenciály metodou konečných prvků:

$$\begin{aligned}(\Delta - \varepsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2})\phi &= -\frac{\rho}{\varepsilon} \\(\Delta - \varepsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2})\mathbf{A} &= -\mu \mathbf{j} \\ \operatorname{div} \mathbf{A} + \varepsilon\mu \frac{\partial \phi}{\partial t} &= 0 \\ \mathbf{B} &= \operatorname{rot} \mathbf{A}\end{aligned}\quad (1)$$

V soustavě rovnic (1) první relace reprezentuje vlastnosti skalárního potenciálu ϕ , druhá charakterizuje vektorový potenciál \mathbf{A} , třetí je tzv. Lorentzova podmínka a poslední je transformační relace mezi vektorovým potenciálem a magnetickou indukcí \mathbf{B} . Symbol \mathbf{j} zachycuje příslušnou proudovou hustotu, ε a μ vyjadřují elektrické a magnetické vlastnosti médií, která se vyskytují v prostorové geometrii řešení. Při analýze je třeba mít na paměti výrazně nelineární závislost permeability μ na intenzitě magnetického pole u materiálů, které jsou používány pro konstrukci magnetických obvodů.

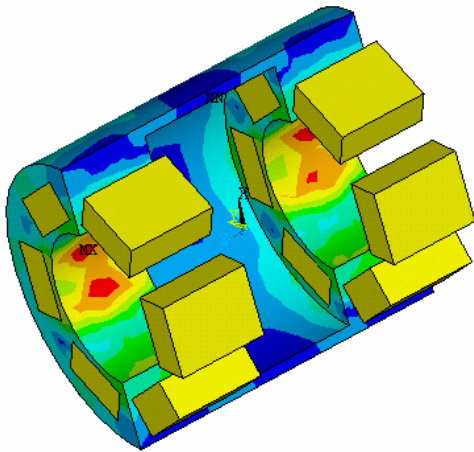
Modelování magnetizační hlavy

Jedním z dominantních kroků modelování je návrh a rozdělení geometrické sítě, která jednak specifikuje prostorové polohy řešení, jednak určuje jejich hustotu. Příklad tohoto postupu je uveden na obrázku č. 1. Zde je ukázána kompletní magnetizační hlava a rozložení sítě. Proces „síťování“ zahrnuje celkem čtyři kroky: přiřazení atributů elementům, nastavení parametrů sítě, uložení databáze a vytvoření sítě.

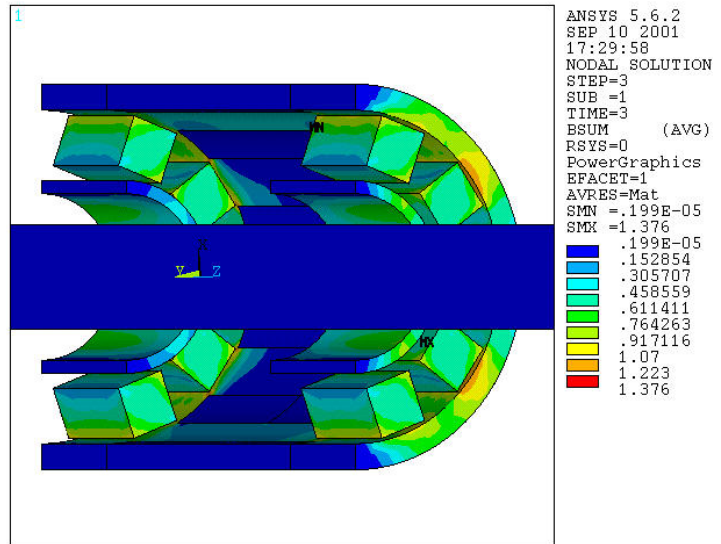


Obr. 1. Rozložení prostorové sítě bodů řešení pro analýzu magnetizační hlavy

Výsledky modelování magnetické indukce v hlavních částech magnetizační hlavy jsou sekvenčně uvedeny na následujících obrázcích. Obr. 2 dokumentuje uspořádání permanentních magnetů a amplitudovou distribuci příslušných hodnot magnetické indukce ve vnějším plášti a v držáku permanentních magnetů. Významným prvkem v magnetické defektoskopii je realizace maximální homogenity pole v diagnostikovaném objektu. Tuto záležitost modelově přibližuje obrázek č. 3. Zde je vidět vliv homogenizátorů (prvky mezi korpusy permanentních magnetů a válcovým objektem) na modulaci magnetického pole v magnetizační jednotce. Experimenty prokázaly, že optimální návrh homogenizátorů výrazně zvyšuje citlivost a přesnost měření. Při vlastní konstrukci magnetického diagnostického zařízení vystupují nejen požadavky fyzikální

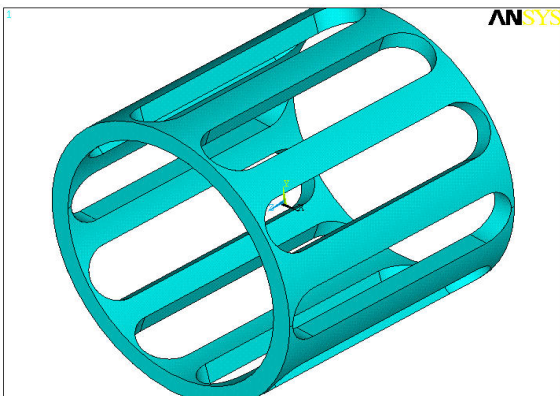


Obr. 2. Geometrická konfigurace permanentních magnetů a odpovídající rozložení magnetické indukce

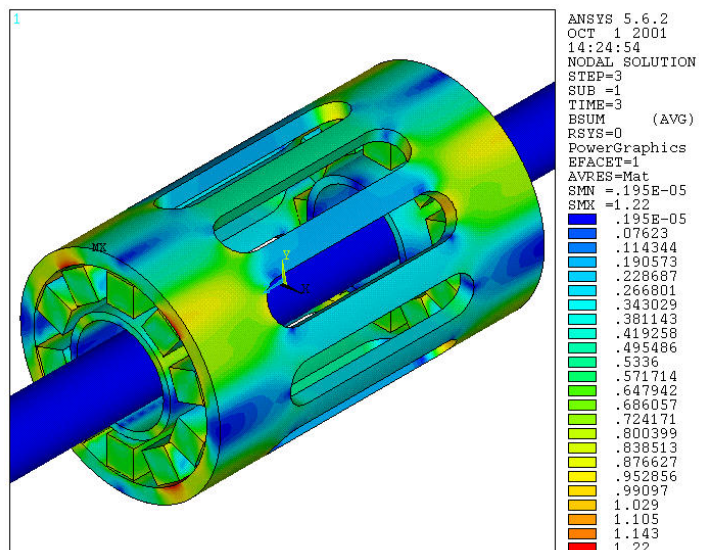


Obr. 3. Vliv homogenizátorů na rozložení magnetické indukce v magnetizační hlavě

a technické, ale i ergonomické. Jedním z nich je potřeba minimalizovat celkovou hmotnost zařízení. Obrázek č. 4 prezentuje možnost výrazného snížení hmotnosti aplikací „klecové“ konstrukce pláště generátoru magnetického pole.



Obr. 4. Klecová konstrukce pláště magnetizační hlavy

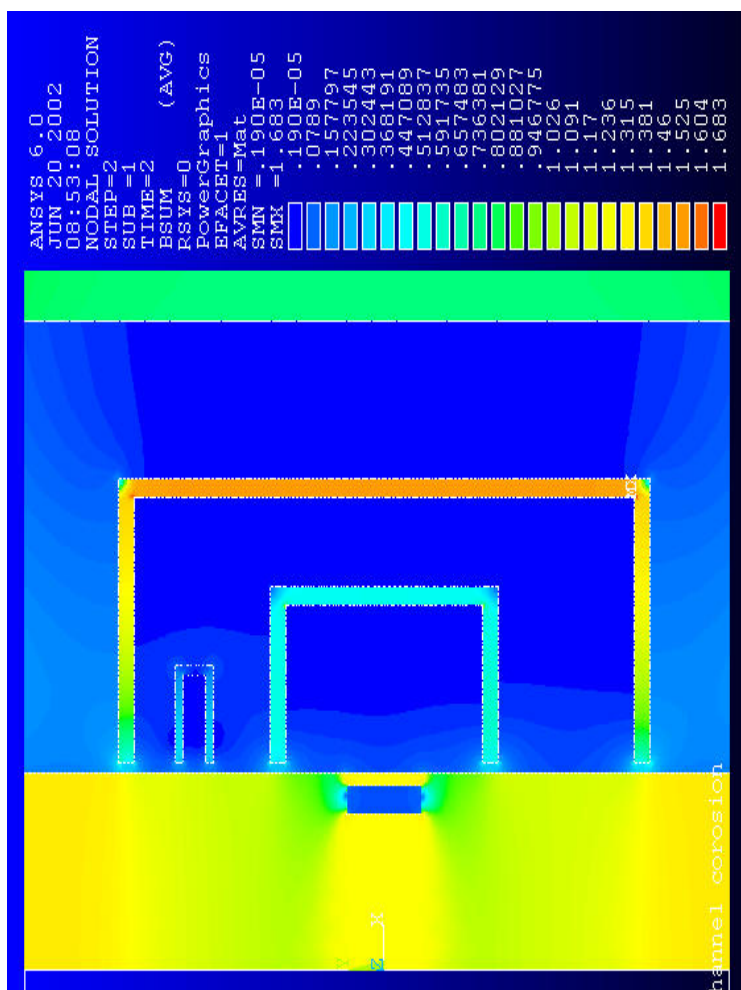


Obr. 5. Rozložení magnetické indukce v kompletní magnetizační hlavě

Celková konstrukční sestava magnetizační hlavy včetně korpusu permanentních magnetů a homogenizátorů je modelově zpracována na obrázku č. 5. Na základě této modelové situace můžeme jednoznačně specifikovat místa, kde dochází ke koncentraci magnetických siločar (oblasti v krajních polohách magnetizační jednotky v dělicím řezu – zařízení z hlediska praktického použití musí být symetrické vůči dělicí rovině), případně, kde je magnetizace nízká a můžeme tedy uvažovat o další redukci materiálu (oblasti vnějšího pláště). První realizovaný prototyp magnetického defektoskopu řady REMAT prokázal výrazné snížení hmotnosti transformací plné válcové plochy magnetizačního generátoru na strukturu klecovou

a modelové aproximace nabízejí další hmotnostní redukce optimalizací magnetického toku ve vnějším magnetickém obvodu (plášti) magnetizační hlavy (zvětšení průzorů a zmenšení tloušťky pláště).

Modelování detekčního korpusu



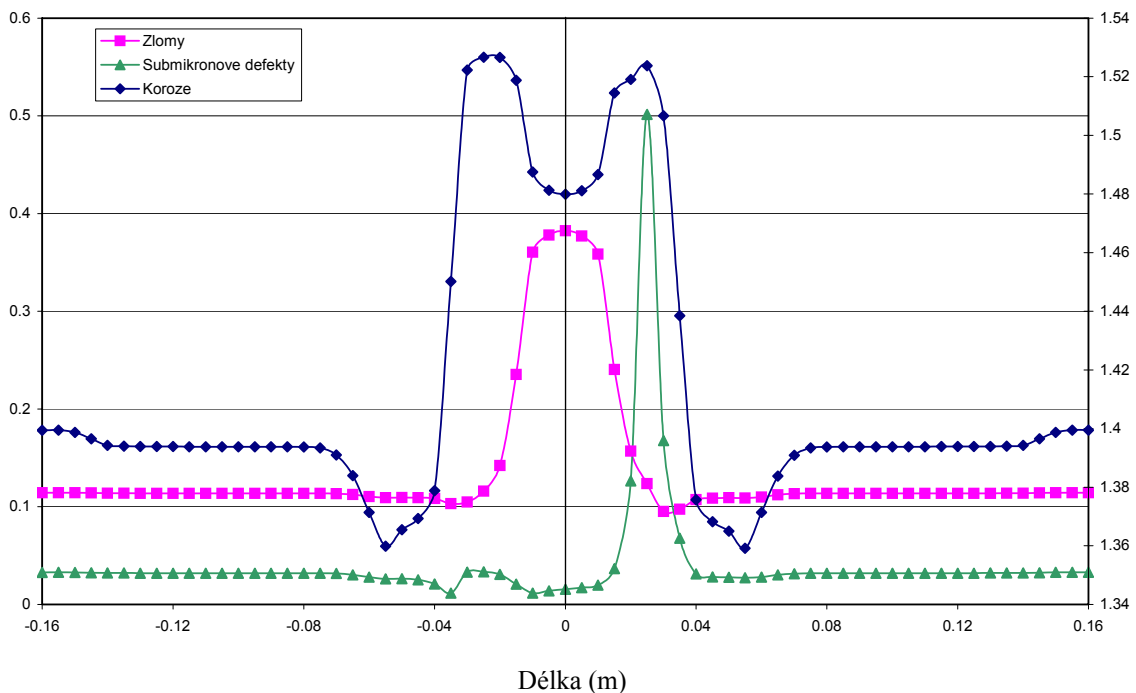
Obr. 6. Modelování hustoty magnetických siločar v okolí jednotlivých snímacích obvodů včetně modulace tohoto pole vlivem poruchy

Signálová odezva poruchy

Pro posouzení kvality snímačů byla modelově zpracována situace, kdy byl analyzován signál v jednotlivých kanálech generovaný ekvivalentní defektem. Porucha je tvořena prstencovým útvarem o šířce 1.5 milimetru a hloubce 3 milimetry, který se nachází po obvodu. Signálová odezva kanálu koroze, zlomů a mikrodefektů je prezentována na obrázku číslo 7. Z obrázku ukázkově vyplývá fyzikální princip měření magneto-motorického napětí. Snímací mechanický obvod kanálu koroze je příliš široký s ohledem na geometrii defektu. Porucha se zobrazuje v axiálním měřítku na úseku osmi centimetrů a záznam je tvořen několika extrémy, které souvisejí s orientací magnetického toku vzhledem k pohybu poruchy podél snímačů. Kanál zlomů transformuje tutéž poruchu do axiálního intervalu čtyř centimetrů. S ohledem na velikost tohoto typu snímacího jha pozorujeme monolitický průběh s jedním maximem a nižší amplitudovou úrovní. Nejreálněji „transformuje“ velikost poruchy kanál mikrodefektů. Zde odezva v podélném směru činí kolem deseti milimetrů a s vysokou přesností kopíruje skutečnou geometrii poruchy a distribuci radiálních polí, které jsou generovány magnetickými siločarami v okolí poruchy. Navíc je zřejmé, že kratší vzdálenost v radiálním směru ramen snímacích obvodů přesněji zachytí gradient magnetického pole buzeného defektem. To se ve výstupním signálu projeví ostřejším a amplitudově zesíleným průběhem.

Geometrické uspořádání jednotlivých detekčních obvodů typu „U“ je na obrázku č. 6. Snímač s největším axiálním rozpětím (35 milimetrů) je určen pro detekci nelokálních poruch (např. koroze – proto i název kanál koroze). Uvnitř tohoto jha jsou umístěny dva další snímací obvody. Snímač s axiální geometrií 15 milimetrů (analýza zlomů a větších trhlin) je vstupním obvodem kanálu zlomů. Třetí, nejnověji připravený, je detektor pro studium mikrotrhlin (vzdálenost radiálních částí snímacího jha je 2.5 milimetru), který měří gradient magnetomotorického napětí v krátké axiální vzdálenosti. Tento prvek je vstupním elementem kanálu mikrodefektů.

Obrázek č. 6 demonstruje rozložení magnetické indukce v okolí snímacích obvodů. Teoretická situace je doplněna umělou poruchou (v centrální oblasti). Zřetelně jsou vidět vlivy defektu na distribuci pole a magnetické „stínění“ magneticky měkkým materiálem sensorového jha kanálu koroze. Současně lze identifikovat modulaci rozptylového pole vlivem přítomnosti snímače mikrodefektů.

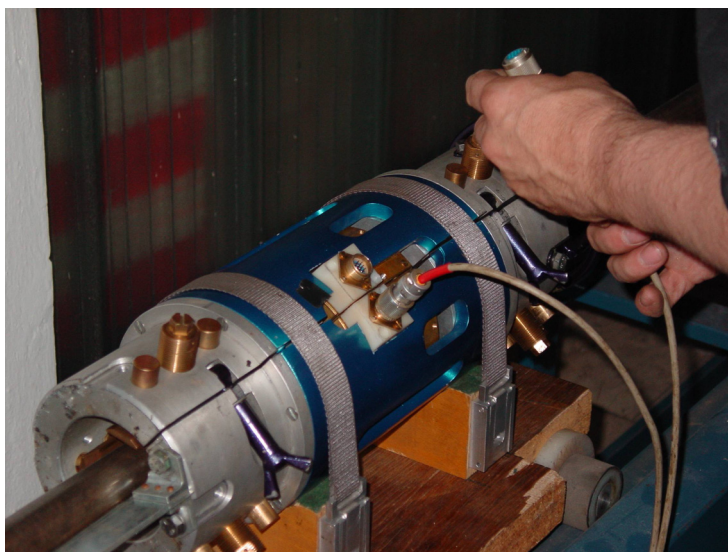


Obr. 7. Průběh výstupního signálu v jednotlivých detekčních kanálech generovaný shodným radiálním defektem

Konstrukce magnetického defektoskopu REMAT

Magnetický defektoskop typu REMAT se skládá z magnetizační hlavy, korpusu snímačů a zesilovačů, inkrementální jednotky, záznamového modulu a přenosného počítače.

Konstrukce magnetického defektoskopu je patrná z obrázku č. 8. Magnetický tok je generován soustavou permanentních magnetů s vysokou hodnotou $H_c B_r$ na bázi vzácných zemin typu SmCo, která je umístěna v krajních oblastech magnetizační jednotky. Permanentní magnety jsou uspořádány tak, že generovaný magnetický tok prochází pláštěm magnetizační hlavy a magnetický obvod se uzavírá prostřednictvím diagnostikovaného úseku lana respektive feromagnetické trubky. Rozptylová magnetická pole, která jsou buzena v okolí zmagnetovaného objektu, jsou analyzována detekčními obvody realizovanými na principu magnetického jha. Systém REMAT je vybaven trojicí paralelních snímačů (obr. 9). Tato konstrukce umožňuje již ve fázi detekce oddělit signály, které jsou odezvami různých typů poruch (koroze, zlomy, mikrotrhliny).

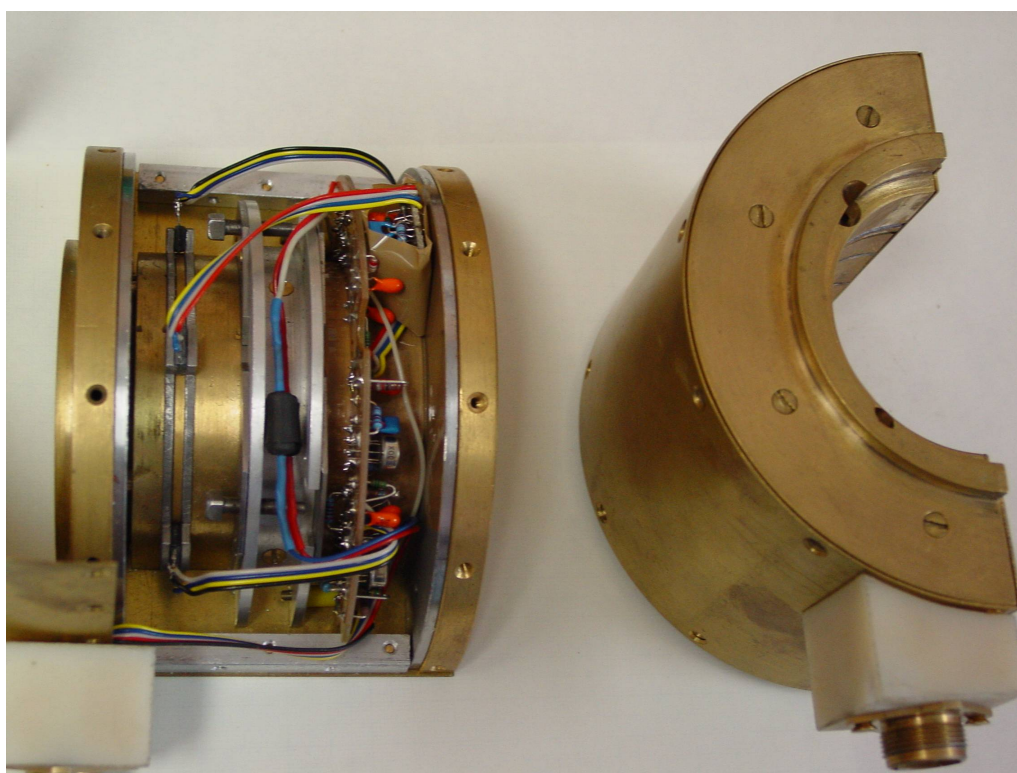


Obr. 8. Konstrukce magnetického defektoskopu typu REMAT

Konverze magnetického toku na elektrický signál je prováděna pomocí Hallových sond s nízkou úrovní teplotního driftu. Součástí snímacího korpusu jsou i měřicí zesilovače pro amplitudové zesílení signálu. Výstupní signál na kabelových konektorech dosahuje úrovně, která zabezpečí spolehlivý přenos signálu po drátovém vedení na vzdálenost řádově několik desítek metrů. Ve speciálním přitlačném držáku na magnetizační hlavě je umístěno inkrementální čidlo, které je jednak zdrojem vzorkovacích impulzů v měřicích kanálech, jednak přináší informace o geometrické pozici poruchy na diagnostikovaném objektu. Naměřená data jsou kabelem přenášena k záznamníkovému modulu, kde probíhá konverze analogového signálu na digitální. Tento modul je prostřednictvím komerční měřicí karty (National Instruments) propojen s přenosným počítačem. Zde je signál ukládán v paměťové jednotce a následně zpracováván s využitím celé škály softwarových produktů (Fourierova transformace, FFT, waveletová transformace, různé typy filtrů atd.).

Výsledkem celého tohoto procesu je interpretace signálu, tedy přiřazení konkrétních typů poruch jednotlivým signálovým výstupům.

Experimentální testy systému REMAT prokázaly, že lze tímto zařízením specifikovat změny příčného průřezu (vyvolané různými typy defektů – koroze, zlomy, úbrusy, atd.) těles válcového tvaru (ocelová lana, trubky) s mezní přesností 0.3%.



Obr. 9. Korpus tříkanálového snímače. Kanál koroze je charakterizován největší axiální roztečí (snímací prvky v krajních polohách korpusu). V centrální pozici jsou umístěny magnetické obvody kanálu zlomů. Senzor mikrotrhlin je umístěn v levé části s trojicí signálových vývodů

Poděkování:

Teoretické a experimentální práce byly realizovány v rámci projektu Grantové agentury České republiky č. 105/01/0168.

Literatura

- [1] Wangness, R., K.: Electromagnetic fields. New York, Willey, 1994, 420 s.
- [2] Ripka, P., Vértesy, G.: Sensors based on soft magnetic materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215/216, 2000, s. 795-799.
- [3] Oka, M., Enokizono, M., Todaka, T., Akita, M., Chady, T., Tsuchida, Y., Sikora, R., Gratkowski, S.: High sensitive rotational magnetic flux sensing. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 196/197, 1999, s. 369-371.
- [4] Tumanski, S., Bakon, T.: Measuring system for two-dimensional testing of electrical steel. *Journal Magnetism and Magnetic Materials*, 223, 2001, s. 315-325.
- [5] Kreutzbruck, M.v., Allweins, K., Gierelt, G., Krause, H.-J., Gartner, S., Wolf, W.: Defect detection in thick aircraft samples using HTS SQUID magnetometers. *Physica C*, 368, 2002, s. 85-90.
- [6] Krause, H.-J., Kreutzbruck, M. v.: Recent developments in SQUID NDE. *Physica C*, 368, 2002, s. 70-79.
- [7] Wooh, S., Ch., Wang, J.: Nondestructive characterization of defects using a novel hybrid ultrasonic array sensor. *NDT and E International*, 35, 2002, s. 155-163.
- [8] Speliotis, D., E.: Magnetic recording beyond the first 100 Years. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 193, 1999, s. 29-35.
- [9] Shen, J., Kirschner, J.: Tailoring magnetism in artificially structured materials: the new frontier. *Surface Science*, 500, 2002, s.300-322.
- [10] Kortright, J., B., Awschalom, D., D., Stohr, J., Bader, S., D., Idzerda, Y., U., Parkin, S., S., P., Schuller, I., K., Siegmann, H.-C.: Research frontiers in magnetic materials at soft X-ray synchrotron radiation facilities. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 207, 1999, s. 7-44.
- [11] Minkov, D., Lee, J., Shoji, T.: Study of crack inversions utilizing dipole model of a crack and Hall element measurements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 217, 2000, s. 207-215.
- [12] Kruusing, A.: Optimizing magnetization orientation of permanent magnets for maximal gradient force. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 234, 2001, s. 545-555.
- [13] Pištora, J., Lesňák, M., Vlček, J., Foukal, J.: Magnetic defectoscope with permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 196/197, 1999, s. 283-285.
- [14] Pištora, J., Lesňák, M., Janík, M., Foukal, J.: The short detector for magnetic testing. *Materials Science Forum*, 373/376, 2001, s. 465-468.
- [15] ANSYS, Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.

Summary

The paper is oriented on the basic theory and experimental results related to new construction of magnetic equipment for nondestructive inspection of steel ropes and pipes.

The physical principle of magnetic testing is based on the generation of secondary magnetic field, which is created by magnetized body. The flux lines of magnetized object do not all cross the defect area directly. It means generally that the longitudinal and radial components of magnetic field are observed.

FEM (Finite Element Method) has been performed in the combination with ANSYS software package. As regards the geometrical profile of the device the application of 3D model with scalar potential formulation is presented.

There is amplitude modulation of magnetic flux in measured corpus by the geometrical forming of external mantle of equipment. The continuous envelope of the cylindrical magnetized body has been reconstructed on the base of mathematical modeling. The shape of the mantle can be characterized as the cage geometry with air window stripe areas. This approach enables us to modify the magnetic

resistance of the magnetic field generator and in consequence of this to optimize the value of magnetic flux in diagnostic body. The discussed modulation of the magnetic flux can be amplified by the application of different ferromagnetic cartridges in air windows.

The magnetic exciting circuit is equipped with rare earth permanent magnets (SmCo version), which are as the source of magnetic flux. Their coercivity is high enough to prevent demagnetization event in very strong negative magnetic fields. Using permanent magnet materials with high level of $B_r H_c$ enables to reduce weight and volume parameters of the magnetization corpus. This process of weight reducing is supported by the new type of head mantle configuration too. The basic body of the magnetization head is made from magnetic circuit steel (AREMA).

The sensing module is located inside between the poles of the magnetization head. The sensing is divided to three independent channels. One of them is used for the detection of slow decay in the cross-section of the rope (corrosion channel). The second and the third magnetic yokes are placed inside the previous circuit (breakage and micro channel, respectively).

The realization of inspect unit with optimized value characterized by the optimized level of magnetic flux confirmed the theoretical assumptions related to the importance of magnetic exciting in the inspected bodies. The maximal response of magnetic analyzer to surface and internal damages of the diagnostic subject depends strongly on the level of body magnetization. The cage diagnostic unit enables relatively easy to perform the amplitude modulation of magnetic flux by magnetic material changing in the window stripe areas. By this adjustment we can tune the sensitivity of equipment. Together with the application of the modern mathematical methods in signal processing (e.g. wavelet transformation) can be reached the new quality in nondestructive testing. The experimental tests of discussed device proved that the alternations of cross section of diagnostic subject less 0.3% are generally indicated.

Recenzent: Mgr. Petr Slivečka, Technické laboratoře Opava, a.s.