

Jaroslav Džmura

Aplikácia magnetických materiálov v indukčných snímačoch na monitorovanie aktivity čiastkových výbojov

Abstrakt: Meranie a monitorovanie aktivity čiastkových výbojov je jednou z bežne používaných metód na zisťovanie stavu izolačného systému v silnoprúdových zariadeniach. Na takéto monitorovanie existujú rôzne metódy zahŕňajúce priame galvanické meranie, akustickú metódu alebo meranie indukčnou metódou. Indukčné meranie čiastkových výbojov využíva indukčné snímače, ktoré snímajú prúdové impulzy čiastkových výbojov vyskytujúce sa vo vysokonapäťovom obvode. Citlivosť takýchto snímačov závisí od ich dizajnu, konštrukcie a použitých materiálov pre jadro snímača. Výber magnetického materiálu je veľmi dôležitý pre dosiahnutie optimálnych hodnôt citlivosti snímača. Boli skonštruované experimentálne senzory s použitím rôznych magnetických materiálov a rôznej konštrukcie. V tomto príspevku bol vybraný magnetický materiál na báze Fe-Ni (Permalloy). Bol navrhnutý optimálny konštrukčný typ a magnetický materiál jadra pre tieto snímače. Minimálna akceptovateľná citlivosť snímača bola stanovená ekvivalentnou citlivosťou merania pri použití priamej galvanickej metódy.

Kľúčové slová: čiastkový výboj; indukčný snímač; magnetický materiál; meranie čiastkových výbojov;

Abstract: The measurement and monitoring of partial discharge activity is one of the commonly used methods to determine the status of insulation system in high voltage power devices. For such monitoring there are various methods involving direct galvanic coupled measurement, acoustic method or measurement by inductive method. Inductive measurement of partial discharges uses inductive sensors, which sense the partial discharge pulses occurring in high voltage circuit. The sensitivity of such sensors depends on their design, construction and materials used for sensor core. The choice of magnetic material is very important to achieve optimal values of sensor sensitivity. We have constructed experimental sensors using different magnetic materials and different construction. In our experiments we have selected magnetic material based on Fe-Ni (Permalloy). We were able to examine the optimal construction type and magnetic material of sensor core for this sensor. The minimum acceptable sensitivity of the sensors was determined by equivalent measuring sensitivity when using direct galvanic method. (**Application of Magnetic Materials in Inductive Sensors for Partial Discharge Activity Monitoring**)

Keywords: partial discharge, inductive sensors; magnetic material; partial discharge measurement;

I. ÚVOD

Dlhá životnosť a spoľahlivosť sú požiadavky, ktoré musí spĺňať izolačný systém elektrických zariadení a ďalšie materiály požadované pre oblasť priemyslu vysokonapäťových elektrických zariadení.

Vysokonapäťové zariadenia mali komplikovaný tvar, konštrukciu a konfiguráciu elektródového systému. Existujú rôzne typy porúch spôsobujúce čiastkové výboje, napr. v izolácii statora [1]. To je ešte komplikovanejšie, keď sa v zariadení vyskytujú ionizujúce a nehomogénne elektrické polia. Výbojová aktivita je jedným z kľúčových kvantitatívnych ukazovateľov stavu vysokonapäťového elektroizolačného systému. Na monitorovanie aktivity čiastkového výboja existujú rôzne metódy vrátane meraní pomocou indukčných snímačov [2]. Citlivosť takýchto snímačov silne závisí od ich konštrukcie a použitých materiálov [3]. Výber magnetického materiálu je veľmi dôležitý pre dosiahnutie optimálnych hodnôt citlivosti snímača [4].

II. VLASTNOSTI INDUKČNÝCH SNÍMAČOV

Navrhli sme snímač, ktorý je spojený s obvodom meraného zariadenia [5]. Na obr. 1 je zobrazené usporiadanie a konštrukčná schéma snímača. Vzájomnú indukčnosť je možné vypočítať podľa rovnice

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot N_2 \cdot h \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1)$$

a pre vlastnú indukčnosť platí rovnica

$$L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot N_2^2 \cdot h \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

$\mu_0 = 1,253 \cdot 10^{-6}$ H/m – permitivita vákua,

μ_r – relatívna permitivita materiálu toroidu,

N_2 – počet závitov sekundárneho vinutia,

h – výška toroidu,

r_1 – vnútorný polomer toroidu,

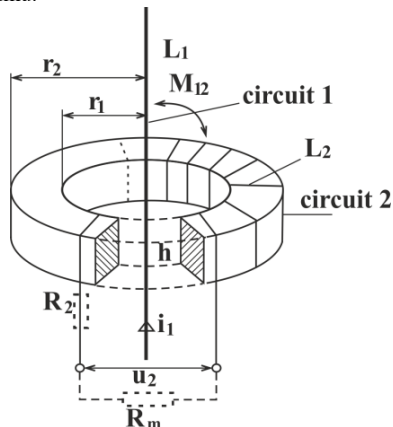
r_2 – vonkajší polomer toroidu.

Transformačný koeficient je $k = M_{12}/L_2 = 1/N_2$. Zvláštnosťou tejto konštrukcie snímača je nezávislosť transformačného koeficientu na tvare primárneho vodiča. Funkciu prenosu možno vypočítať z rovnice:

$$\frac{u_2}{i_1} = \frac{M_{12} \cdot R}{L_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} = \frac{R}{N_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} \quad (3)$$

Ako je vidieť z rovnice (3), táto funkcia závisí od kmitočtu a znamená to, že indukčnosť obvodu sa mení podľa priepustnosti materiálu jadra. Okrem toho hodnota μ_r závisí tiež od kmitočtu.

Vychádzajúc z vyššie uvedených rovníc môžeme konštatovať, že sú splnené podmienky pre malé striedavé alebo impulzné prúdy. Vstup sekundárnej cievky sa chová ako elektrický obvod s vysokou vstupnou impedanciou. Nižší počet vinutí zaisťuje vyššiu odolnosť voči signálom vonkajšieho šumu.



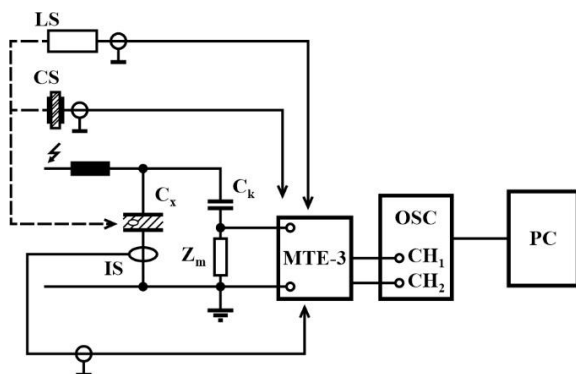
Obr. 1. Indukčný snímač.

Pre prevádzku v oblasti striedavých prúdov sú vhodné neretenčné materiály s koercivitou $H_e > 800$ A/m. Majú tenkú hysteréznú krivku a vysokú hodnotu počiatočnej permeability μ_p a maximálnej permeability μ_m . Výhodou navrhnutého indukčného snímača je ďalej to, že dokáže merať aj zvodový prúd izolačného systému pri kmitočte 50 Hz, čo je ďalší parameter udávajúci stav izolačného materiálu [6].

Pri meraní signálu čiastkového výboja indukčnými snímačmi predpokladáme, že materiál jadra nie je presýtený, t.j. pracuje pri veľmi nízkych hodnotách H . Počiatočná permeabilita má významný vplyv na citlivosť merania a táto hodnota je závislá od teploty a kmitočtu. Ako bolo namerané v experimentoch, μ_r testovaných materiálov sa výrazne mení nad kmitočtom $5 \cdot 10^5$ Hz.

III. EXPERIMENTÁLNA ZOSTAVA

Pre naše experimenty sme na porovnanie použili indukčnú metódu monitorovania čiastkových výbojov spolu s priamou galvanickou metódou. Zostava na meranie je na obr. 2.



Obr. 2. Schéma zapojenia meracej zostavy.

LS – lineárny snímač; CS – kapacitný snímač; IS – indukčný snímač; C_x – testovaný objekt; C_k – väzobný kondenzátor; MTE-3 – merač čiastkových výbojov; OSC – osciloskop; PC – počítač;

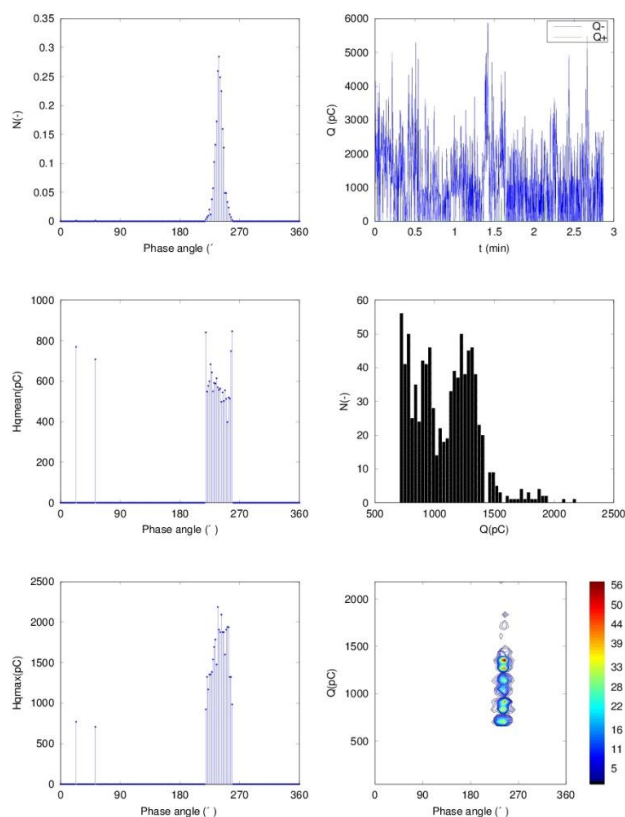
Našou testovanou vzorkou bola vysokonapäťová cievka statorového vinutia. Merania boli vykonané v laboratórnych podmienkach v súlade s normou IEC60270 s uzemneným testovaným objektom.

V prvom prípade sme použili metódu priameho merania, ktorá je spoľahlivá a široko používaná na meranie základných parametrov pri meraní čiastkových výbojov. Testovaná cievka bola umiestnená na izolovanej podložke, aby sa zabránilo kontaktu povrchu cievky s inými predmetmi, čo by spôsobilo parazitné čiastkové výboje. Aby sa zabránilo korónovým výbojom, umiestnili sme na vysokonapäťový koniec vinutia homogenizačnú elektródu.

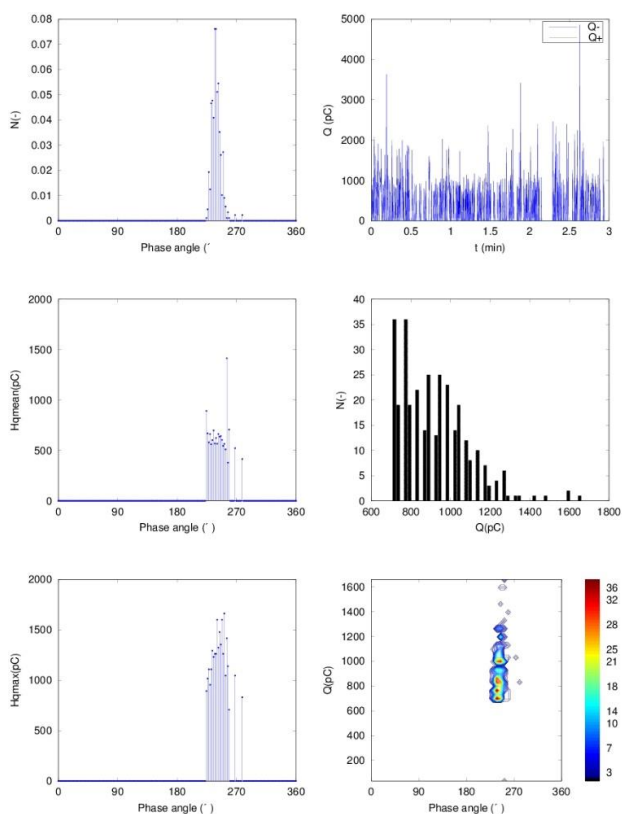
Testované napätie bolo zvyšované až do iniciačného napätia, keď došlo k prvým čiastkovým výbojom. Pri tomto napätí boli zaznamenané parametre čiastkových výbojov. Ďalej sa napätie zvyšovalo o 500 V až do napätia 5 kV. Na každej napäťovej úrovni sa merali a zaznamenávali parametre čiastkových výbojov.

Pre druhú sadu meraní bola použitá nepriama metóda merania s indukčným snímačom umiestneným v magneticky tienenom kryte a zapojeným do prevádzkového uzemňovacieho obvodu vysokonapäťovej cievky. Testovacie napätie sa zvyšovalo až do iniciačného napätia. Na tejto úrovni sa merala a zaznamenávala aktivita výbojov. Neskôr sa napätie zvyšovalo s krokom 500 V až do napätia 5 kV. Na každej úrovni napätia sa merala aktivita výbojov.

Materiál snímača bol magnetický materiál na báze Fe-Ni (Permalloy).



Obr. 3. Fázové rozloženie čiastkových výbojov pri napätí 2,5 kV pri meraní galvanickou metódou.



Obr. 4. Fázové rozloženie čiastkových výbojov pri napätí 2,5 kV pri meraní indukčnou metódou.

IV. ZHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

Získané údaje boli vyhodnotené fázovou analýzou so štatistickými metódami použitými pre súbor výsledkov. Týmto metódami boli vypočítané fázové rozdelenie maximálnych a stredných hodnôt zdanlivého náboja a amplitúdového spektra. Výsledky na obr. 3 boli dosiahnuté priamou galvanickou metódou v porovnaní s výsledkom na obr. 4 pre nepriamu indukčnú metódu. Ako je možné vidieť, všetky namerané štatistické parametre vypočítané zo získaného signálu sú v určitom rozsahu porovnateľné, aj keď nie identické. Citlivosť indukčných snímačov je teda porovnateľná s citlivosťou galvanickej metódy a je prijateľná pre účely monitorovania.

V. ZÁVER

Pre porovnanie boli vykonané merania priamou galvanickou a nepriamou indukčnou metódou na cievkach vysokonapäťových točivých strojov. Ako sme pozorovali, metóda nepriameho merania využívajúca senzory s materiálmi ako magnetický materiál na báze Fe-Ni (Permalloy) poskytuje dostatočnú citlivosť potrebnú na získanie signálu čiastkových výbojov so všetkými dôležitými informáciami v signáli uchovanými pre štatistické hodnotenie činnosti čiastkových výbojov.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV v rámci projektu VEGA 02/0011/20.

LITERATÚRA

- [1] L. Lisoň, I. Kolečunová, M. Kmec, "Effect of Thermal Ageing on the Oil-Paper Insulation." In: *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 14, No. 4, 2014, p. 23–26, DOI:10.15546/aei-2014-0036.
- [2] J. Balogh, J. Džmura, J. Petráš, "Inductive sensors for indirect partial discharge measurement," In: *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. Vol. 59, no. 3 (2011), p. 33-36. ISSN 1582-5175.
- [3] A. Ali, A. Amir, U. Abdin, M. Zain, "Resolution Enhancement in Directly Interfaced System for Inductive Sensors," In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, Iss. 10, p. 4104-4111, Part: 2, ISSN: 0018-9456.
- [4] M. Pavlík, L. Kruželák, M. Mikita, M. Špes, S. Bucko, L. Lisoň, M. Kostelec, L. Beňa and P. Liptai, "The impact of electromagnetic radiation on the degradation of magnetic ferrofluids," In: *Archives of Electrical Engineering*. Vol. 66, no. 2 (2017), p. 361-369. ISSN 1427-4221.
- [5] E. Svenman, A.K. Christiansson, A. Runnemalm, "Experimental validation of an inductive probe for narrow gap measurement based on numerical modelling," In: *Measurement*, Vol. 146, 2019, p. 396-402, ISSN 0263-2241.
- [6] D. Jiao, L.W. Ni, X.L. Zhu, J. Zhe, ZY. Zhao, YG. Lyu, ZX. Liu, "Measuring gaps using planar inductive sensors based on calculating mutual inductance," In: *Sensors and Actuators A-Physical*, Vol. 295, p. 59-69, ISSN: 0924-4247.
- [7] E. Svenman, "Modeling of inductive coil geometry for gap position measurement," In: *Procedia Manuf.*, 25 (2018), pp. 103-110.
- [8] J. Balogh, J. Petráš, J. Džmura, "Induktívne sondy a hranice ich použitia pri snímaní povrchových výbojov," In: *Electrical Engineering and Informatics 6 : proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice*. - Košice : FEI TU, 2015 p. 75-80. ISBN 978-80-553-2178-3.

ADRESY AUTOROV

Jaroslav Džmura, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04200, Slovenská Republika, jaroslav.dzmura@tuke.sk