

Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity

Ing. Michal Vojenčiak

**Vplyv feromagnetika na vlastnosti
vysokoteplotných supravodivých pások**

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor
v študijnom programe **5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo**

Bratislava, 2010

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Elektrotechnickom ústave Slovenskej Akadémie Vied v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Michal Vojenčiak
EIÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Školiteľ: Ing. Ján Šouc CSc.
EIÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa:
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia 5.2.48 Fyzikálne inžinierstvo, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie

Predseda spoločnej odborovej komisie:

Prof. Ing. Jozef Sitek DrSc.
Katedra jadrovej fyziky a techniky FEI STU,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Úvod

Cieľom práce je analyzovať vplyv feromagnetických materiálov v tesnej blízkosti supravodivých vodičov. Supravodiče sa v súčasnosti využívajú v rôznych formách v množstve praktických aplikácií. Táto práca je zameraná na vysokoteplotné supravodiče vo forme pásov. Takéto vodiče sa využívajú najmä v priemyselných aplikáciách, kde sa využíva fakt, že dokážu prenášať elektrický prúd s vysokou prúdovou hustotou. Úžitkové vlastnosti vysokoteplotných supravodivých vodičov výrazne závisia od rozloženia magnetického poľa. Jednou z možností ako ovplyvniť rozloženie tohto poľa v blízkom okolí supravodiča je usmernenie magnetického toku pomocou feromagnetického materiálu. Takáto zmena predstavuje jednoduchú a lacnú možnosť zlepšenia vlastností výsledného zariadenia. Na druhej strane, feromagnetický materiál robí svojimi nelineárnymi a hysteréznymi vlastnosťami celý systém zložitejší. V aplikáciách využívajúcich striedavý prúd môžu byť kritickým faktorom práve prídavné straty vo feromagnetiku. Navyše, rovnako ako môže feromagnetikum vlastnosti zariadenia zlepšiť, môže ich rovnakým spôsobom aj zhoršiť. Za úžitkové vlastnosti supravodiča sa v tejto práci považuje kritický prúd a striedavé straty, teda disipácia pri prenose striedavého prúdu, resp. pri aplikovaní striedavého magnetického poľa. Meracie zariadenie pre meranie striedavých strát v kompozitných páskach supravodič-feromagnetikum je teda nevyhnutné pre experimentálnu časť tejto práce. Keďže meracie zariadenie pre meranie striedavých strát v prípade aplikovaného striedavého magnetického poľa nie je štandardné, jednou z úloh práce je aj vývoj takéhoto zariadenia.

Práca sa po úvodnej teoretickej časti zaoberá analýzou meracích metód pre experimentálne určenie vlastností supravodičov, feromagnetík a ich kompozitov. Záverom tejto časti je podrobný popis návrhu meracieho zariadenia pre meranie striedavých strát v aplikovanom striedavom magnetickom poli a testov vlastností tohto zariadenia.

Nasledujúca časť práce sa venuje multifilamentárnej supravodivej páske BiSCCO-2223 v matici zo zliatiny striebra. Autor práce [1] navrhol povrch takejto pásky čiastočne pokryť vrstvou feromagnetického niklu. Takáto vrstva usmerňuje smer magnetického toku a výrazne ovplyvňuje vlastnosti výslednej kompozitnej pásky supravodič feromagnetikum. V tejto práci sme myšlienku usmernenia magnetického pomocou niklovej vrstvy na povrchu supravodivej pásky rozvinuli a parametre pokrytia sme optimalizovali samostatne pre každú z troch základných úžitkových vlastností.

Zariadenie pre meranie striedavých strát v aplikovanom magnetickom poli.

Toto zariadenie musí byť schopné merať vlastnosti vzoriek predpokladaných v tejto práci vo všetkých dôležitých režimoch. Základné požiadavky sú zhrnuté v tabuľke 1.

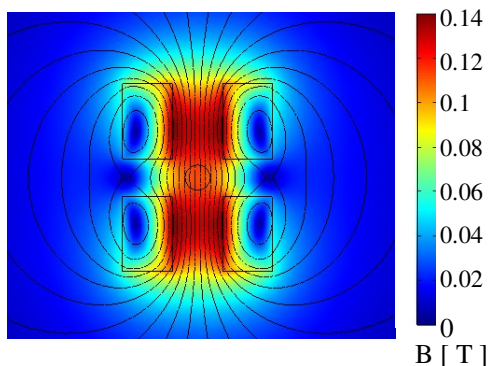
Tabuľka 1.

Parameter	Požadovaná hodnota
Amplitúda mag. poľa	> 100 mT
Rozsah frekvencií	20 – 100 Hz
Priestor pre vzorku	> 10 x 100 mm
Homogenita mag. poľa	> 95 %
Citlivosť	10^{-6} W

Ako základná meracia metóda je použitá „metóda bez potreby kalibrácie“ (calibration free method) [2]. Metóda bola vybraná s ohľadom na problémy pri kalibrácii ostatných používaných metód alebo ich nedostatočnú citlivosť. Magnetické pole je vytvárané pomocou oválnej cievky. Tvar prierezu vinutia bol navrhnutý s pomocou metódy konečných prvkov. Pre zvýšenie homogenity magnetického poľa v priestore cievky je táto v strednej rovine rozdelená – obr. 1. Takýto tvar prierezu cievky umožňuje aj umiestnenie držiaka vzorky s možnosťou rotácie.

Metóda konečných prvkov umožnila aj výpočet indukčnosti cievky pri danom počte závitov. To umožnilo návrh počtu závitov pri dodržaní maximálneho prístupného napätia avšak pri čo najnižšom prúde.

Vyrobené zariadenie spĺňa požiadavky na menovitú hodnotu magnetického poľa aj rozsah frekvencií. Pri vyšších frekvenciách však nespĺňalo požiadavku na citlivosť, čo je zrejme spôsobené stratami vírivými prúdmi vo vinutí cievky. Preto bola vyrobená prídavná kompenzačná slučka umiestnená na otočnom držiaku, ktorá umožňuje ...

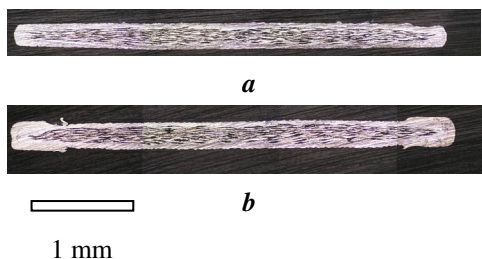


Obrázok 1. Rozloženie indukcie magnetického poľa v cievke a jej okolí. Priestor pre vzorku je naznačený krúžkom v strede cievky.

kompenzáciu strát vírivými prúdmi a zvýšiť citlivosť merania v určitom rozsahu až o niekoľko rádov.

Kompozitný vodič nikel - supravodič BiSCCO-2223

Ako východzí materiál sme sa rozhodli použiť komerčnú multifilamentárnu pásku BiSCCO-2223 v matrici zo zliatiny striebra. Táto páska má kritický prúd vo vlastnom poli 100 A pri teplote 77 K. Fotografia prierezu východzieho supravodivého vodiča spolu s typickým prierezom supravodivej pásky s čiastočným pokrytím povrchu niklom je na obr. 2.



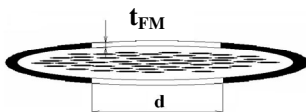
Obrázok 2. *a* – Fotogrfia prierezu východzej supravodivej pásky
b – rozmery elipsy nahrádzajúcej prierez supravodivého jadra pásky.
c – fotografia prierezu pásky s povrchom čiastočne pokrytým niklom.

Keďže jednotlivé filamenty majú medzi sebou silnú elektromagnetickú väzbu, správajú sa ako jeden filament. Vo všetkých výpočtoch sme preto reálny prierez supravodivého jadra vodiča nahradili eliptickým prierezom s mernými vlastnosťami prepočítanými vždy na tento prierez.

Vlastnosti supravodiča sú vo výpočtoch reprezentované veľkosťou kritickej prúdovej hustoty, ktorá je závislá na lokálnom magnetickom poli. Parametre tejto závislosti sú odvodené z meraní kritickeho prúdu vo magnetickom poli aplikovanom pod rôznym uhlom vzhľadom na širšiu stranu pásky.

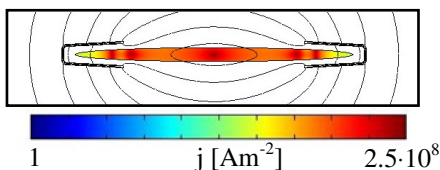
Vo výpočtoch rozloženia magnetizácie je magnetizačná slučka niklu nahradená nelineárnou krivkou, ktorá tvorí priemer z dvoch vetiev magnetizačnej slučky. Pre výpočet strát vo feromagnetiku je potom využitá lokálna amplitúda magnetickej indukcie a známa závislosť strát na amplitúde magnetickej indukcie meraná na referenčnej vzorke niklu.

Parametre nikloveho pokrytia, ktoré sme optimalizovali, sú šírka nepokrytej oblasti d a hrúbka niklovej vrstvy t_{FM} (znázornené na obr. 3).



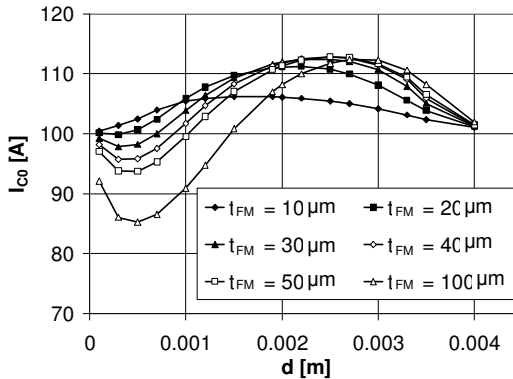
Obrázok 3. Schématické znázornenie supravodivej pásky s feromagnetickým pokrytím. Vyznačené sú optimalizované parametre niklovej vrstvy.

Optimalizácia na maximálny kritickej prúd je založená na výpočte rozloženia kritickej prúdovej hustoty. Kritickej prúd je určený integráciou prúdovej hustoty v priereze supravodiča. Komerčný program pre výpočty metódou konečných prvkov určí také rozloženie prúdovej hustoty v supravodiči a magnetizácie vo feromagnetiku, ktoré vyhovuje všetkým zadaným vzťahom. Príklad rozloženia prúdovej hustoty pre jednu konkrétnu pásku je znázornený na obr. 4.



Obrázok 4. Rozloženie prúdovej hustoty a čiary konštantného vektorového potenciálu pre prípad supravodivej pásky s čiastočným feromagnetickým pokrytím $t_{FM} = 30 \mu\text{m}$, $d = 2.5 \text{ mm}$.

Takýmto spôsobom bol vypočítaný kritický prúd pre rôzne kombinácie parametrov niklového pokrytia a vytvorené optimalizačné krivky znázornené na obr. 5.



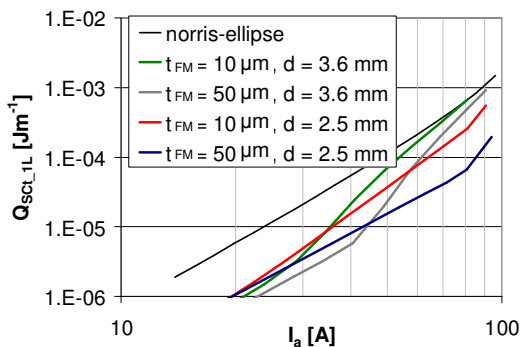
Obrázok 5. Optimalizačné krivky parametrov pokrytia vzhľadom na maximálny kritický prúd. Keďže šírka a naša u staršej páske je 4,2 mm, hodnota $d = 4,2$ mm zodpovedá pôvodnej, nepokrytej, páske.

Optimálna šírka nepokrytej oblasti d je rôzna pre hrôzne hrúbky vrstvy. Všeobecne je však optimálna hodnota d pre túto pásku medzi 3 a 4 mm. V tejto oblasti kritický prúd najskôr výrazne rastie (10 – 20 μm), pri hrúbkach väčších ako 40 μm už ďalej nestúpa.

Pre výpočet striedavých strát bola použitá modifikovaná Campbellova metóda [3]. Pomocou tejto metódy bolo vypočítané rozloženie prúdovej hustoty v supravodiči a magnetizácie vo feromagnetiku pre diskrétné okamihy počas periódy striedavého transportného prúdu, resp. aplikovaného magnetického poľa.

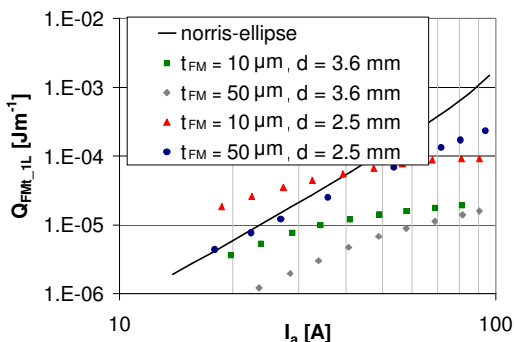
Vypočítané transportné straty pre vybrané parametre niklovej vrstvy sú zobrazené na obr. 6 – 8. V týchto obrázkoch sú straty porovnané s Norrisovým modelom pre transport striedavého prúdu supravodičom s eliptickým prierezom. Tento model sa výborne zhoduje so stratami meranými na pôvodnej páske.

Na obr. 6 sú znázornené straty v samotnom supravodiči. V oblasti malých amplitúd transportného prúdu sú straty v supravodiči výrazne nižšie pre všetky znázornené kombinácie parametrov niklovej vrstvy. Keďže v hrubšej vrstve (50 μm) je magnetizácia nižšia, pokles permeability nastane až pri vyšších prúdoch. Vrstva s menším d efektívne ovplyvňuje aj strednú časť supravodiča, ktorá je významná pri vyšších transportných prúdoch. Preto sú straty výrazne nižšie aj pri vysokých prúdoch.



Obrázok 6. Závislosť strát v supravodiči na amplitúde transportného prúdu pre rôzne parametre niklovej vrstvy.

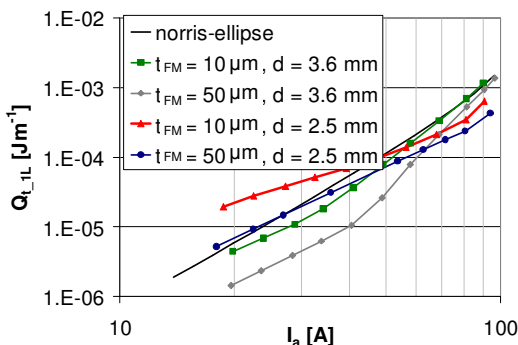
Na obr. 7 sú znázornené straty v niklovej vrstve. Magnetizácia v hrubších vrstvách (50 μm) je nižšia a preto ani pri najvyšších prúdoch straty nezačnú saturovať ako je to pri tenších vrstvách (10 μm).



Obrázok 7. Závislosť strát v niklovej vrstve na amplitúde transportného prúdu pre rôzne parametre niklovej vrstvy.

Zároveň však hrubšia vrstva niklu predstavuje väčší objem feromagnetika, preto sú saturačné straty v hrubších vrstvách väčšie. Z rovnakého dôvodu sú straty pri $d = 2,5$ mm vyššie ako pri $d = 3,6$ mm.

Celkové straty v kompozite prenášajúcom transportný prúd sú dané súčtom strát v supravodiči a strát vo feromagnetiku, zobrazené sú na obr. 8. V oblasti nízkych prúdov sú straty jednoznačne najnižšie pre $d = 3,6$ mm a $t_{\text{FM}} = 50$ μm . Ako však vidno z obr. 6, v oblasti vysokých prúdov už neovplyvňuje takáto vrstva významnú časť supravodiča. Strednú časť supravodiča efektívne ovplyvňuje vrstva s menším d ($d = 2,5$ mm).

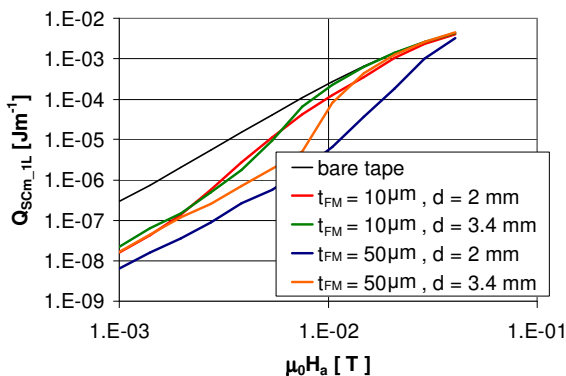


Obrázok 8. Závislosť celkových strát v kompozitnej páske na amplitúde transportného prúdu pre rôzne parametre niklovej vrstvy.

Páska s takouto vrstvou má síce vyššie celkové straty, ale v oblasti tesne pod kritickým prúdom sú celkové straty nižšie. Je to dané tým, že v oblasti nízkych prúdov prevažujú straty vo feromagnetiku, zatiaľ čo pri vysokých prúdoch začínajú prevažovať straty v supravodiči.

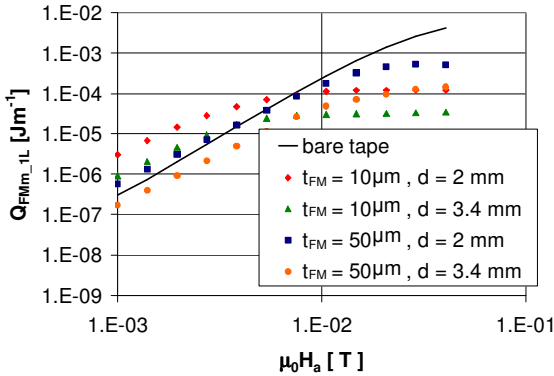
Záver optimalizácie pomocou výpočtu je, že niklová vrstva by mala byť čo najhrubšia a parameter d závisí od oblasti v ktorej majú byť straty najnižšie. Pre oblasť nízkych prúdov je výhodná vrstva s vysokou hodnotou d , zatiaľ čo pre oblasť vysokých prúdov je výhodná vrstva s nižšou hodnotou d .

Vypočítané magnetizačné straty pre vybrané parametre niklovej vrstvy sú zobrazené na obr. 9 – 11. V týchto obrázkoch sú straty porovnané s vypočítanými stratami v pôvodnej páske.



Obrázok 9. Závislosť vypočítaných strát v supravodiči na amplitúde aplikovaného magnetického poľa pre rôzne parametre niklovej vrstvy.

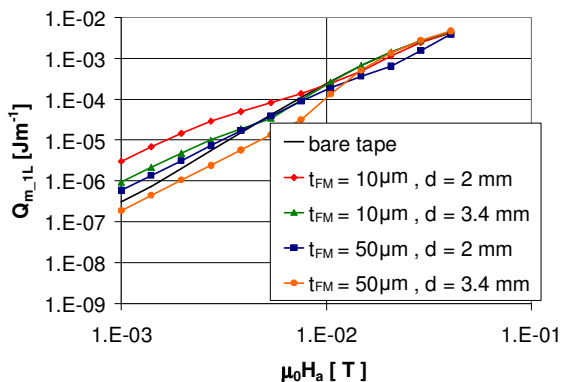
Vrstva hrubá 10 μm ovplyvňuje magnetické pole v supravodiči len pri malých amplitúdach. Pri vyšších amplitúdach je saturovaná. Pri hrúbke 50 μm a $d = 3,4$ mm vrstva tieni supravodič od magnetického poľa v nižších aplikovaných poliach, ale pri vyšších aplikovaných poliach pole preniká do strednej časti supravodiča, ktorú takáto vrstva neovplyvňuje. Vrstva s $d = 2$ mm tento nedostatok odstraňuje a znižuje straty v supravodiči v širšom rozsahu.



Obrázok 10. Závislosť vypočítaných strát v niklovej vrstve na amplitúde aplikovaného magnetického poľa pre rôzne parametre niklovej vrstvy.

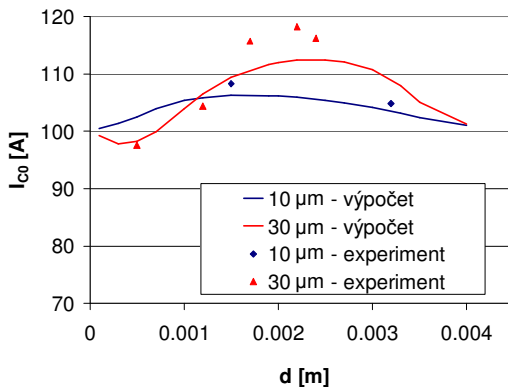
Niklová vrstva s hrúbkou 10 μm a $d = 2$ mm saturuje pri pomerne nízkych poliach, pretože demagnetizačné pole je menšie ako v ostatných prípadoch. Podobne aj vrstva s $d = 3,4$ mm, ale saturačné straty sú v tomto prípade nižšie kvôli menšiemu objemu feromagnetika. Najvyššie saturačné straty sú vo vrstve s $d = 2$ mm a $t_{FM} = 50$ μm .

Niklová vrstva znamená prídavné magnetizačné straty. Pri hrúbke vrstvy 10 μm tieto prevyšujú zníženie strát v supravodiči (obr. 11). Celkové straty sa teda prevažne zvýšia. Vrstva s parametrami $d = 2$ mm a $t_{FM} = 50$ μm síce zníži spomedzi zobrazených vrstiev straty v supravodiči najviac, ale má vysoké straty vo feromagnetiku. Preto má celkový pozitívny efekt len v úzkom rozsahu aplikovaných polí. V oblasti nízkych polí má najlepší vplyv vrstva s parametrami $d = 3,4$ mm a $t_{FM} = 50$ μm , hoci straty v supravodiči sú vyššie ako v prípade vrstvy s $d = 2$ mm.



Obrázok 11. Závislosť vypočítaných celkových strát v kompozitnej páske na amplitúde aplikovaného magnetického poľa pre rôzne parametre niklovej vrstvy.

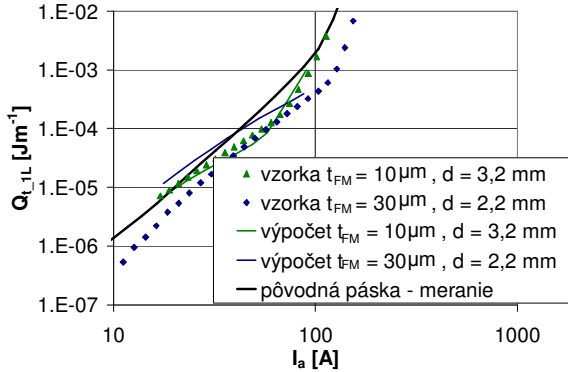
Pre overenie vyššie uvedených výpočtov sme vyrobili niekoľko vzoriek, ktorých vlastnosti sme porovnali s vypočítanými. Na obr. 12 sú porovnané vypočítané a namerané kritické prúdy vo vlastnom poli.



Obrázok 12. Porovnanie vypočítaných a nameraných kritických prúdov.

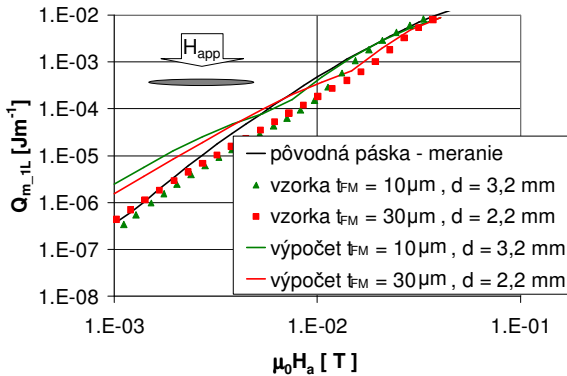
Hoci výsledky kvalitatívne približne súhlasia, namerané kritické prúdy sú vyššie ako vypočítané. Pravdepodobne je to spôsobené tým, že vlastnosti niklu sú v skutočnosti mierne odlišné od tých, ktoré sú predpokladané vo výpočte.

Na obr. 13 sú porovnané vypočítané a merané straty v dôsledku striedavého transportného prúdu v kompozitnej páske.



Obrázok 13. Porovnanie vypočítaných a meraných strát striedavým transportným prúdom.

Vypočítané a merané straty sa výborne zhodujú pre pásku s feromagnetikom hrubým 10 μm . Pri hrúbke 30 μm sú však vypočítané straty výrazne vyššie. Tento efekt je výraznejší pri nižších prúdoch, čo naznačuje, že vo výpočte sú nadhodnotené straty vo feromagnetiku, pretože v tejto oblasti prevažujú.



Obrázok 14. Porovnanie vypočítaných a meraných magnetizačných striedavých strát.

Na obr. 14 sú porovnané vypočítané a merané straty v dôsledku aplikovaného striedavého poľa. Opäť sú zrejme nadhodnotené straty v niklovej vrstve. To naznačuje, že najviac by bolo zrejme potrebné zlepšiť charakterizáciu vlastností feromagnetika.

Zhrnutie

Vyvinuté a úspešne otestované bolo nové meracie zariadenie na meranie striedavých magnetizačných strát. Toto zariadenie umožňuje spoľahlivé meranie absolútnej hodnoty magnetizačných strát v materiáli v homogénnom aplikovanom magnetickom poli s veľkosťou magnetickej indukcie do 0,1 T a s frekvenciou do 100 Hz. Zariadenie umožňuje jednoduchú zmenu smeru magnetického poľa vzhľadom na vzorku. Nevýhodami tohto zariadenia sú dvojnásobná veľkosť a spotreba v porovnaní s ostatnými inými zariadeniami pre meranie magnetizačných strát v supravodičoch. Dôležitou výhodou je spoľahlivosť nameraných výsledkov. Táto vlastnosť meracieho zariadenia bola využitá pri niekoľkých meraniach na zložitejších systémoch supravodivých vodičov [6, 7] kompozitov supravodič-feromagnetikum [3, 8 a 9].

Ako bolo ukázané inými autormi [1], čiastočné pokrytie supravodivej pásy feromagnetickým materiálom môže zlepšiť úžitkové vlastnosti supravodivej pásy. Avšak rovnaký postup môže úžitkové vlastnosti aj zhoršiť. Z tohto dôvodu je optimalizácia feromagnetického pokrytia nevyhnutná. V tejto práci sme optimalizovali feromagnetické pokrytie supravodivej pásy vzhľadom na tri rôzne parametre: kritický prúd supravodiča vo vlastnom poli, transportné striedavé straty a magnetizačné striedavé straty. Analýzou sme ukázali, že optimalizácia vzhľadom na každý z týchto parametrov vyžaduje rôzne parametre feromagnetického pokrytia. Vypočítané vlastnosti kompozitu sme analyzovali, aby sme popísali všetky dôležité fyzikálne procesy. V nasledujúcom kroku sme pripravili niekoľko vzoriek, aby sme overili vypočítané výsledky. Napriek tomu, že sa vypočítané výsledky kvantitatívne líšia od experimentálnych výsledkov, kvalitatívne sa zhodujú.

Na záver sme našli kompromisnú kombináciu parametrov pokrytia a vyrobili sme vzorku s podstatným zlepšením všetkých troch analyzovaných parametrov. Kritický prúd tejto vzorky sa zvýšil o 17%. Transportné striedavé straty sa znížili 5 násobne v oblasti amplitúd striedavého prúdu tesne pod kritickým prúdom a viac ako 2 násobne sa znížili v celom rozsahu meraných prúdov. Magnetizačné striedavé straty tejto vzorky v kolmom poli sa v rozmedzí amplitúd aplikovaného poľa 2 až 20 mT znížili viac ako dvojnásobne.

Summary

The main aim of this work is to analyse the influence of additional ferromagnetic parts on properties of high-temperature superconductors (HTS). The study is focused on HTS of so-called first generation, wires of BiSCCO-2223 superconductor in silver alloy matrix and sheath. The properties of the superconductors and superconductor-ferromagnetic material composites were studied by means of numerical simulations and also experimentally. The properties that were analysed are the critical current of the conductor, the AC loss due to AC transport current and the AC loss due to applied AC magnetic field. For the last property, a new device was needed for the experimental study. Finally, experiences from the study of single conductors were used for study of power transmission cables with ferromagnetic parts.

The new measuring device for the magnetisation loss measurement was developed and successfully tested. This device allows the reliable measurement of the absolute value of any material magnetisation loss in homogeneous magnetic field up to 0.1 T and frequency up to 100 Hz. The device allows the easy change of applied magnetic field angle with respect to the sample. The drawbacks of this device are double size and consumption in comparison to other systems for superconductor magnetisation loss measurements. The important advantage of this device is the reliability of results. This fact was used in several measurements on more complicated systems of superconducting conductors [6, 7] and superconductor-ferromagnetic material composites [3, 8, and 9].

As it was shown by another author [1], partial cover of the superconducting tape by ferromagnetic material can improve the tape performance. However, the same technique can make the performance worse, therefore optimisation of the ferromagnetic cover is necessary. We optimised the nickel cover on BiSCCO-2223 tape using a numerical procedure for three different parameters: self-field critical current, transport AC loss and magnetisation AC loss. We have shown that optimisation for each parameter requires different parameters of the nickel cover. We analysed the calculated results in detail, to find all the important physical processes. In the next step, we prepared several samples to verify the calculated results. Although there are some quantitative differences between calculated and experimental results, the results agree qualitatively. Finally, we found a compromise, and we prepared the sample with significant improvement in all three studied parameters of performance.

The critical current of the particular sample was improved by 17%. Transport loss in the same sample was reduced 5 times at current amplitudes close to critical current and more than 2 times in the whole range of measured current amplitudes. Finally, magnetisation AC loss of this sample was reduced more than 2 times in perpendicular magnetic fields with amplitudes between 2 and 20 mT.

Referencie

- [1] Alamgir, A.K.M, Gu, C., Han, Z.: *Experiment of enhancing critica current in Bi-2223/Ag tape by means of ferromagnetic shielding*, Physica C **432** (2005) 153-158
- [2] Šouc, J., Gömöry, F. and Vojenčiak, M.: *Calibration free method for measurement of the AC magnetization loss*, Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 592–595
- [3] Gömöry, F., Vojenčiak, M., Pardo, E., and Šouc, J.: *Magnetic flux penetration and AC loss in a composite superconducting wire with ferromagnetic parts*, Supercond. Sci Technol. **22** (2009) 034017
- [4] Sato, S. and Amemiya, N.: *Electromagnetic field analysis of an YBCO coated conductor exposed to the non-uniform magnetic field in superconducting cables*, Physica C **432** (2005) 215-222
- [5] Inada, R., Nakamura, Y., Oota, A.: *Evaluation of AC losses in cable conductors using thin superconducting tapes with non-uniform $J(c)$ distribution*, Physica C **442** (2006) 139-144
- [6] Šouc, J., Vojenčiak, M., and Gömöry, F.: *Experimentally determined transport and magnetization ac losses of small cable models constructed from YBCO coated conductors*, Supercond. Sci Technol. **23** (2010) 045029
- [7] Terzieva, S., Vojenčiak, M., Pardo, E., Grilli, F., Drechsler, A., Kling, A., Kudymow, A., Gömöry, F., and Goldacker, W.: *Transport and magnetization ac losses of ROEBEL assembled coated conductor cables: measurements and calculations*, Supercond. Sci Technol. **23** (2010) 014023.
- [8] Gömöry, F., Vojenčiak, M., Pardo, E., Solovyov, M., and Šouc, J.: *AC losses in coated conductors*, Supercond. Sci Technol. **23** (2010) 034012.
- [9] Gömöry, F., Pardo, E., Vojenčiak, M., and Šouc, J.: *Magnetic flux penetration and transport AC loss in superconductor coated conductor on ferromagnetic substrate*, IEEE Trans. Applied Supercond. **19** (2009) 3102-3105.