

Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave
Katedra teoretickej a experimentálnej elektrotechniky

Ing. Eduard Demenčík

Autoreferát dizertačnej práce

Magnetické polia v okolí vysokoteplotných supravodičov
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ v statickom a dynamickom režime

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti Philosophiae Doctor, **PhD**
V odbore doktorandského štúdia 26-02-9 **Teoretická elektrotechnika**

Bratislava, 2005

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci dennej formy doktorandského štúdia na Elektrotechnickom ústave SAV v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Eduard Demenčík
Oddelenie elektrodynamiky supravodičov
ELÚ SAV
Bratislava

Školiteľ: Ing. Milan Polák, DrSc.
Oddelenie elektrodynamiky supravodičov
ELÚ SAV
Bratislava

Oponenti:

RNDr. Alexander Cigáň, CSc.
ÚM SAV, Bratislava

Prof. RNDr. Peter Kúš, DrSc.
KEF FMFI UK, Bratislava

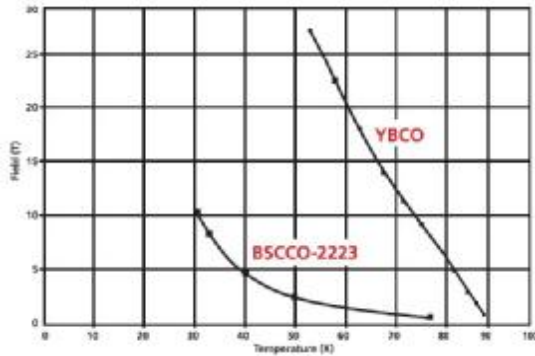
Ing. František Žížek, CSc.
Škoda výzkum, Plzeň

Autoreferát bol rozoslaný dňa:
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa: o hod pred
komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia 26-02-9
Teoretická elektrotechnika, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie
dňa: ,
na Elektrotechnickom ústave SAV, Dúbravská cesta 9, Bratislava.

Predseda spoločnej odborovej komisie:
Prof. Ing. Jozef Sláma, Csc.

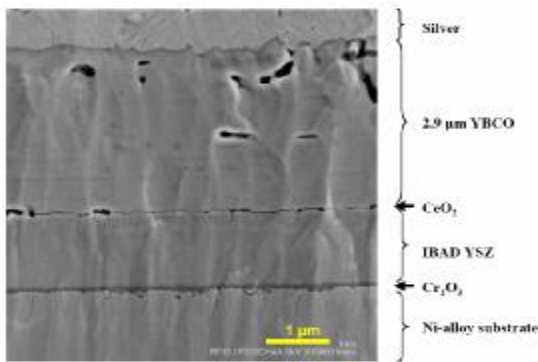
1 Úvod

V súčasnosti je veľký záujem o aplikácie vysokoteplotných supravodičov (VTS), najmä veľmi prespektívnych vodičov 2. generácie, YBCO coated conductor (2G VTS). Veľká výhoda týchto vodičov je vysoké pole ireverzibility, pri teplote kvapalného dusíka $T=77K$ až okolo 8 - 10T [1][2] pre kolmú geometriu pole-páska. Pre porovnanie v súčasnosti po technologickej stránke najlepšie zvládnutý vodič VTS Bi-2223/Ag má hodnotu poľa ireverzibility B_{irr} len okolo 0.3 T pri 77K [1][3], obr. 1. Pole ireverzibility je hodnota magnetického poľa, pri



Obr. 1 Polia ireverzibility pre Bi-2223 a YBCO pre kolmú orientáciu poľa na CuO supravodivé roviny [1]

ktorej vzorka už nevedie supravodivý transportný prúd, hoci je supravodivá až po horné kritické pole B_{c2} resp. B_{c3} . Pre mnohé praktické aplikácie je limitujúca práve úroveň B_{irr} . Vysoké hodnoty B_{irr} sú jedným z najsilnejších motivujúcich faktorov prečo sa venuje v súčasnosti YBCO tak vysoká pozornosť. Nie je to však jediný faktor. Na tenkých vrstvách YBCO sa dnes dosahujú aj veľmi vysoké hodnoty kritickej prúdovej hustoty v ráde $10^6 A.cm^{-2}$. V súčasnosti sú vyvinuté zariadenia schopné pripraviť súvislé pásy dĺžky desiatky metrov s $I_c = 300 A.cm^{-1}$ s vysokou homogenitou. Taktiež, YBCO je najmenej anizotropný materiál z VTS pásov a neobsahuje toxické látky, ktoré by mohli ohrozovať zdravie. Určité problémy sú so stabilitou vodiča a hlavne znížením strát, ktoré je nutné pre aplikácie v AC režime. Ako je vidno, v technológii prípravy sú iste veľké rezervy, zdá sa ale, že technológia napreduje veľmi rýchlo a v súčasnosti sa tejto problematike venuje mnoho špičkových firiem. American SuperConductor (ASC) dnes vyrába pásy dĺžky 20 m, šírka 4 cm, ktoré sú neskôr zrezané na štandardnú šírku 0.44 cm. Očakáva sa, že koncom roku 2005 bude dĺžka 100 m, v priebehu 2 rokov 1000 m a vodiče 2G vytlačia z trhu vodiče 1. generácie 1G, teda Bi-2223/Ag pásy. Naše oddelenie, OES, rieši v rámci projektu FA 8655-03-1-3082, U.S.



Obr. 2 Miroštruktúra YBCO [2]

projektu FA 8655-03-1-3082, U.S. Air Force, týkajúce sa vývoja vodiča pre supravodivý generátor s výkonom približne 5 MW a pomerom hmotnosť/výkon 0.05kg/kW, [4]. Pracovná frekvencia generátora je 400Hz. Vodič 2G VTS je niekoľkovrstvový a je navrhnutý optimálne s cieľom dosiahnuť čo najvyšší stupeň usporiadania atómov v supravodiči a dosiahnuť čo

najvyššiu možnú kapacitu prenosového prúdu. Prierez skutočného vodiča je vidieť na obr. 2. Vodič vo vinutí je vystavený magnetickému poľu a vznikajú v ňom tieto druhy strát [5]:

- Hysterézne straty:
$$\frac{P_{hyst.}}{V_{YBCO}} = \frac{2}{p} \cdot f \cdot W_{YBCO} \cdot J_c \cdot B_p \quad (1)$$

kde f - frekvencia, W_{YBCO} - šírka pásiky YBCO, J_c - kritická prúdová hustota, B_p - kolmá zložka indukcie mag. poľa, V_{YBCO} - je objem vrstvy. Hysterézne straty teda klesajú úmerne šírke pásiky W_{YBCO} .

- Straty vírivými prúdmi v podložke $P_{eddy,sub}$ a straty vírivými prúdmi v ochrannej vrstve Ag, resp. Au [6]:

$$P_{eddy} = \frac{2p^2 f B_m^2 J_{M,y}}{r_{Ag}} n_f \quad (2)$$

kde $J_{M,y} = W_f^3 t / 12$ (t je hrúbka ochranej striebornej vrstvy, prípadne substrátu), ρ_{Ag} je merný odpor vrstvy pri 77K za predpokladu že polšírka filamentu $W_f / 2$ je menšia ako hĺbka vniku δ , n_f je počet filamentov, B_m je hustota toku aplikovaného magnetického poľa a f je frekvencia.

- Magnetizačné straty v podložke zapríčinené vlastnou magnetizáciou materiálu $P_{mag, sub}$
- Vo vodiči, ktorý pozostáva z viacerých tenkých supravodivých pásikov môžu za určitých predpokladov (vodivé prepojenie medzi filamentami) vznikajú okrem vyššie uvedených strát aj väzbové straty, ktoré sú vyvolané prúdmi tečúcimi pozdĺž filamentov a na krajoch uzatvárajúcimi sa priečne cez filamente [5]:

$$P_{coupl} = 2 \frac{(BfL)^2}{r_{tr}} d_n W \quad (3)$$

kde B je amplitúda hustoty magnetického toku, f je frekvencia, d_n je hrúbka normálnej kovovej vrstvy a ρ_{tr} je priečny odpor, W je šírka pásiky, L je krok stáčania, pričom sa predpokladá, že nestočená páska s dĺžkou L sa správa z hľadiska väzbových strát rovnako ako stáčaný vodič s dĺžkou kroku stáčania $2L$. Tieto straty vznikajú v dôsledku indukcie tzv. väzobných prúdov v páske v prípade, že sú pozdĺžne filamente vodivo spojené v priečnom smere či už cez podložku, alebo kovovú stabilizačnú vrstvu.

Hlavnou zložkou strát sú hysterézne straty vzhľadom na vysokú hodnotu J_c a šírku W_{YBCO} , ktorá je v súčasnosti 6-12mm. Ich zníženie je možné dosiahnuť rozdelením súvislej vrstvy YBCO na užšie pásiky (filamente) so šírkou $W_f \ll W_{YBCO}$, ako vyplýva z (1). Vzorok YBCO coated conductors, ktoré sme mali k dispozícii mali charakteristickú šírku 10mm a boli rozdelené metódou laserovej ablácie na 20 úzkych pásikov úzkych približne 0.5mm. V našom laboratóriu sa používajú na mapovanie magnetických poľí v blízkosti týchto pásov Hallove

sondy. Boli vypracované metódy merania a bezkontaktného určovania volt – ampérových charakteristík z týchto meraní [7][8][9]. Táto metodika bola rozšírená jednak o možnosť použitia do vyšších elektrických polí a použitie pre filamentárne pásy. Jedna z najdôležitejších úloh tejto práce bol návrh, realizácia a skúšky meracej metódy vhodnej pre meranie magnetických polí s frekvenciou rádovo do 1kHz.

2 Súčasný stav riešenej problematiky a ciele dizertačnej práce

Objektami skúmania boli v našom prípade krátke VTS pásy YBCO a Bi-2223/Ag. Na YBCO páskach bolo cieľom overiť vplyv vonkajšieho AC poľa na amplitúdu a tvar magnetických profilov, ktoré nepriamo určujú distribúciu prúdu v páske. Zaujímalo nás ako sa s frekvenciou externého poľa mení distribúcia prúdu v rôznych YBCO páskach. Doterajšie techniky umožňovali merania do max. frekvencií rádovo 0.5Hz. Úspešné vyriešenie tejto úlohy nám umožnilo robiť bezkontaktné merania magnetických polí v okolí VTS vodičov vyvinutých v rámci horeuvedeného projektu. Hlavným cieľom týchto magnetických meraní bolo určenie nehomogenít v kritickom prúde v páske. Meranie magnetického poľa nad páskou vystavenou pôsobeniu kolmého AC externého poľa na jej povrch umožňuje skúmať ktoré druhy strát v páske prevažujú, čo je rozhodujúce pre ďalší vývoj vodiča pre aplikácie v priemysle. Rozšírili sme použitie metodiky na bezkontaktné určovanie E-J charakteristík v tenkých páskach YBCO pre oblasť vyšších frekvencií a to nie len pre celistvé pásy, ale aj pre multifilamentárne pásy. Pomocou týchto techník sme určovali aké druhy prúdov tečú v páskach, či vo vodičoch vznikajú prídavné väzbové, či vírivé prúdy. Pri použití transportných metód je často problémom vyhotovenie prúdových kontaktov s nízkym merným odporom. Často sa to nedarí a nedostatočne nízky odpor kontaktov spôsobuje pri prechode prúdu ohrev vzorky. Boli vyvinuté impulzné metódy merania I_c , ktoré však spôsobujú vznik elektrických polí nesúvisiacich s pinningom. Vyhodnotenie I_c nie je potom jednoduché.

Okrem uvedeného sme vyvinuli meraciu metódu a úspešne ju použili na štúdium časových závislostí napätia a magnetického poľa v modelových cievkach YBCO pracujúcich v AC režime s frekvenciou do 1kHz [10].

Na Bi-2223/Ag páskach bolo cieľom zistiť nehomogenity v lokálnej distribúcii kritického prúdu I_c v priečnom smere pomocou MN. Zistené nehomogenity v páske sme overovali mapovaním magnetických polí v blízkosti týchto pásk a výsledky oboch experimentálnych metód sme porovnali s modelom predpokladajúcim homogénnu distribúciu prúdu v páske.

Ciele práce sa dajú zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Vyvinúť zariadenie vhodné pre meranie magnetických profilov zložky poľa kolmej na povrch vzorky vlozenej v externom AC poli do frekvencií rádovo 1kHz s použitím Hallových sond
2. Na vzorkách YBCO vodičov:
 - a) experimentálne overiť aký má vplyv vonkajšie AC pole na amplitúdu a tvar magnetických profilov a tým aj nepriamo určiť ako sa s frekvenciou externého poľa mení distribúcia prúdu vo filamentárnych vodičoch YBCO s LaAlO₃ substrátom ako aj vo vodičoch 2. generácie (2G VTS) YBCO s viacnásobne prepojenými filamentami, opísané v kap. 3.1.2
 - b) určiť E-J charakteristiky YBCO pásovk bezkontaktným spôsobom pre oblasť vyšších frekvencií AC externého poľa, z nich určiť parametre: kritický prúd I_c a exponent n , ktoré charakterizujú kvalitu pásky
 - c) vypracovať metodiku určovania E-J charakteristík pre multiflamentárne vodiče a experimentálne overiť elektromagnetické vlastnosti vodičov YBCO s rôznou šírkou filamentov
 - d) z experimentálnych výsledkov analyzovať charakter prúdov tečúcich VTS páskou vystavenou pôsobeniu AC externého magnetického poľa orientovaného kolmo na jej povrch
3. Na vzorkách Bi-2223/Ag vodičov:
 - a) zistiť homogenitu rozloženia lokálnej kritickej prúdovej hustoty v páskach Bi-2223/Ag vedúcich transportný prúd pomocou metodiky tzv. Magnetického Noža (MN)
 - b) určiť veľkosť a homogenitu kritickej prúdovej hustoty vo vodičoch v ktorých tečie transportný prúd nepriamym meraním kolmej zložky magnetického poľa v okolí vodiča pomocou Hallových sond
 - c) porovnať výsledky, ktoré poskytujú obe metódy, MN a Hallove sondy (výpočet mag. profilov z nameraného rozloženia lokálnej distribúcie prúdu a porovnať s profilmi získanými mapovaním Hallovými sondami)
 - d) porovnať profily magnetického poľa reálnych vzoriek s profilom vypočítaným z meranej prúdovej distribúcie určenej MN a modelovým profilom vypočítaným za predpokladu rovnomerného rozloženia prúdovej hustoty naprieč páskou

3 Použité experimentálne metódy

Na skúmanie rozloženia prúdovej hustoty využívame meranie magnetických polí v blízkosti vzoriek pomocou nízkoteplotných Hallových sond. V práci sú prezentované výsledky získané na aparátúre, ktorá bola vyvinutá špeciálne na meranie magnetických polí, v okolí pásovk vystavených pôsobeniu AC externého poľa.

V aparátúre určenej na meranie AC magnetických polí sú použité dve Hallove sondy, ktoré registrujú zložku poľa kolmú na povrch pásky. Jedna z HS je umiestnená mimo pásky tak, že registruje iba externé magnetické pole a slúži na

jeho kompenzáciu. Jej signál sa odčítava od signálu meracej sondy podľa nižšie uvedených vzťahov.

Signál ktorý sníma meracia Hallova sonda sa dá vyjadriť vzťahom:

$$U_{H_mer} = U_{H0} + U_H(B_{ext}) + U_H(B_{vzorka}) + U_{ind}(B) \quad (4)$$

Signál, ktorý sníma kompenzačná sonda:

$$U_{H_komp} = U_{H0} + U_H(B_{ext}) + U_{ind}(B) \quad (5)$$

Rozdiel signálov z Hallových sond zapojených proti sebe, ktorý sa sníma do počítača:

$$U_{H_mer} - U_{H_komp} = \Delta U_{H0} + U_H(B_{vzorka}) + \Delta U_{ind}(B) \quad (6)$$

kde U_{H_mer} a U_{H_komp} sú napätia na meracej, resp. kompenzačnej Hallovej sonde (HS), U_{H0} je tzv. nulové napätie, ktoré je prítomné na napäťových kontaktoch HS vloženej do nulového externého poľa, $U_H(B_{ext})$ je signál odpovedajúci externému poľu, $U_H(B_{vzorka})$ je signál od vzorky, $U_{ind}(B)$ je signál, ktorý sa indukuje v prívodoch Hallových sond a je približne priamoúmerný frekvencii externého poľa. Ako vyplýva zo vzťahu (6), externé mag. pole nie je jediným vplyvom, ktorý treba kompenzovať. Je treba vziať do úvahy nulové napätie na HS a indukované napätie na prívodoch sond.

Zber signálov do počítača je realizovaný pomocou DAQ karty NI 6034E, ktorá umožňuje vzorkovať s rýchlosťou do 200kHz. Meria sa niekoľko veličín „súčasne“ cez predradený multiplexor, prúd tečúci vo vinutí budiaceho Cu magnetu, ako napäťový signál z bezindukčného bočníka (ten je úmerný externému AC poľu), rozdielový signál z HS a signál úmerný polohe vo smere X súradnice. Podmienkový zber dát pomocou DAQ karty umožňuje snímať magnetické pole v blízkosti vzorky pre rozličné fázy externého poľa.

Ďalšia aparátúra použitá v práci je tzv. magnetický nôž (MN) a slúži na určenie lokálnej distribúcie I_c vo VTS páske, [11][12]. S MN som mal možnosť pracovať v rámci projektu ASTRA na partnerskom pracovisku UT Twente, Enschede v Holandsku. Uvedená aparátúra MN slúži na určovanie lokálnej distribúcie kritického prúdu v Bi-2223/Ag páskach. Používal som pri tom dve techniky, jednak nepriame určovanie pomocou merania magnetických profilov nad páskou pomocou Hallových sond, [13] a jednak metódu priameho určovania lokálnym meraním transportného prúdu v páske tzv. magnetickým nožom (MN). MN je zariadenie, ktoré využíva silné potlačenie kritického prúdu pomocou aplikovaného magnetického poľa. Magnetické pole má profilu tvaru skokovej funkcie tak, že v páske vznikne len úzka oblasť, kde pole prechádza nulou, takže transportný prúd pretká prakticky len cez tento úzky kanál. Páska sa posúva tak, že postupne sa profil poľa dostane z jedného okraja pásky na druhý a v každom mieste sa zmeria lokálny kritický prúd I_c klasickou 4-bodovou metódou. Následnou numerickou korekciou sa získajú správne data – priečna distribúcia lokálneho kritického prúdu. Pomocou HS som následne zmeral magnetické profily v blízkosti tých istých pásek, ktorými preteká transportný kritický prúd, definovaný kritériom

elektrické pole $E_0 = 1 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$. Výsledky oboch experimentov sú porovnané s modelom predpokladajúcim homogénnu distribúciu kritického prúdu v páske.

Vzorky supravodičov boli pripravené na partnerských pracoviskách.

a) Prvá séria vzoriek je zameraná na štúdium AC magnetických profilov v okolí vzoriek, pri ktorých z architektúry a technológie prípravy vyplýva, že nie sú vytvorené podmienky pre vznik väzbových prúdov a teda väzbových strát. Vzorky YBCO boli pripravené na podložkách LaAlO_3 , ktoré sú elektricky nevodivé a nemagnetické. Vzorky boli pripravené na univerzite Wuppertal (prof. Moenter).

b) Druhá séria vzoriek je pripravená na substrátoch Ni-W, Hastelloy, ktoré a sú elektricky vodivé a sú magnetické. Jedná sa o vzorky YBCO coated conductors 2. generácie (tzv. 2G VTS). Študovali sme vzorky s kritickými prúdovými hustotami v ráde $\sim 10^6 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$. Ako základná vzorka je použitá celistvá monofilamentárna vzorka. Technikou laserovej ablácie boli z takejto vzorky pripravené ďalšie vzorky na spôsob multifilamentárnej vzorky kôli zmenšeniu hysterézných strát. Boli pripravené aj vzorky s rôzne prepojenými filamentami. Cieľom prepojenia filamentov je umožniť prechod prúdu medzi filamentami v prípade poškodenia niektorých z nich [5]. Vzorky boli pripravené v laboratóriách Wright-Patterson Air Force Base (WPAFB), Dayton, Ohio.

c) Tretiu sériu vzoriek predstavujú VTS supravodivé vzorky Bi-2223/Ag. Súčasťou výskumu bolo zisťovanie rozloženia transportného prúdu vo vodiči s pomocou tzv. magnetického noža v laboratóriu nízkych teplôt na technickej univerzite UT Twente, Holandsko. Vzorky boli pripravené rôznymi výrobcami (firmy VAC, Cryoelectra, ASC a oddelení fyziky supravodičov, EIÚ SAV).

4 Hlavné výsledky

1. Vyvinuli sme techniku na meranie profilov magnetických polí vytváraných magnetizačnými prúdmi, vyvolanými striedavým AC externým magnetickým poľom s frekvenciou od 0.1 Hz do 1 kHz. Ako senzor magnetického poľa sme používali Hallove Sondy (HS). Aparatúra umožňuje charakterizovať vzorky VTS z hľadiska kritickej prúdovej hustoty J_c a strmosti E-J charakteristiky pomocou exponentu n bezkontaktným a nedeštruktívnym spôsobom.
2. Optimalizovali sme hardware (HW) aj software (SW) pre spracovanie signálu. Týmito úpravami sme zvýšili odstup signálu od šumu. Použili sme pri tom vysokokvalitné predzosilňovače, meracie karty a špeciálne SW techniky pre on-line aj off-line spracovanie dát. Šum pozadia pri AC budiacich poliach s frekvenciou 500 Hz je na úrovni rádovo 10 μT , pri DC meraniach je to o dva rády menej, na úrovni 0.1 μT . Pri vzorkách s najslabším signálom (vzorky s najjemnejšími filamentami) je úroveň signálu asi 40 μT .
3. Vypracovali sme metodiku na určovanie vzdialenosti HS od povrchu pásky, ktorá umožňuje dodatočne presnejšie určiť vzdialenosť, približne určenú

z mikro-posuvu polohovacieho stolíka. Táto alternatívna metóda je založená na porovnaní modelového vypočítaným pomocou modelu s meraním magnetického profilu, pričom sa vizuálne zohľadní nielen amplitúda, ale aj tvar profilu.

4. Experimentálne sme potvrdili, že v YBCO páskach pripravených na keramickom substráte LaAlO_3 nevznikajú väzbové prúdy a veľkosť vírivých prúdov je zanedbateľne malá. Straty vznikajúce v tomto type vzoriek sú prakticky čisté hysterézne straty v supravodiči.
5. Amplitúda magnetického poľa, meraná vo vzorkách 1-5, so šírkou filamentov od 40 μm do 1 mm, v rozsahu frekvencií približne od 1Hz do 1kHz, vzrástla iba o 10 až 15%. Toto zvýšenie sme vysvetlili zvýšením amplitúdy magnetizačných prúdov vo vodiči v dôsledku E-J závislosti supravodiča.
6. Merania magnetických polí v blízkosti filamentárnych YBCO coated conductor (pripravených na Ni-W substráte) ukázali výraznejší vzrast amplitúdy poľa vzorky v závislosti od frekvencie. Navyše, amplitúda silne závisela od miesta merania. Pozorované chovanie týchto vzoriek potvrdzuje existenciu väzbových prúdov. Príčinou sú čiastočné skraty supravodivých filamentov na substrát spôsobené odparovaním materiálu pri použití LASER-a pri vytváraní filamentov.
7. Pomocou mapovania polí vytváraných magnetizačnými prúdmi sa nám tiež podarilo detekovať oblasti v ktorých nedošlo k úplnej separácii susediacich filamentov, ktoré ale podľa navrhutej architektúry mali byť separované. Nakoľko hysterézne straty sú priamo-úmerné šírke vzorky, v miestach s neúplnou separáciou filamentov, lokálne hysterézne straty výrazne vzrastajú. V takomto prípade použitie integrálnych techník na meranie strát dáva výsledky výrazne odlišné od výpočtov. Ukázalo sa však, že rôzne typy prepojení susedných filamentov, ktoré boli navrhnuté pre zlepšenie stability pásky málo vplyvajú na amplitúdu a tvar magnetického poľa.
8. Rozšírili sme metódu na bezkontaktné určovanie E-J charakteristík, používanú v DC režime, aj do oblastí vyšších frekvencií a doplnili sme ju o možnosť použitia pre multifilamentárne vodiče.
9. Merania na YBCO páske so súvislou vrstvou ukázali, že vplyv vírivých prúdov v podložke a jej magnetizácia veľmi málo vplyvajú na frekvenčnú závislosť signálu.
10. Väzbové prúdy vznikajúce v páskach B/2 a B/4 majú takmer rovnakú amplitúdu, čo je v dobrom súlade s meraniami strát, z ktorých boli určené priečne odpory v týchto páskach, r_{tr} sú $2.5 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ a $3.17 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$. Tieto hodnoty sú blízke hodnote odporu substrátu, ktorá je $\sim 1.3 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$, [14].
11. Ukázalo sa, že väzbové prúdy netečú iba v okrajových filamentoch pásky, ich priečna distribúcia v páske je veľmi podobná tej, ktorá predpokladá model 2, uvedený v kap. 2.1.2, teda väzbové prúdy naprieč páskou majú

- približne lineárnu distribúciu, podobne ako priebeh elektrického poľa v páske.
12. Pomocou metódy magnetického noža boli určené priečne distribúcie lokálneho kritického prúdu na páskach Bi-2223/Ag s rôznou architektúrou filamentov, vedúcich transportný prúd.
 13. Porovnali sme distribúciu prúdu určenú technikou magnetického noža (MN) s nepriamou technikou určovania prúdu pomocou Hallových sond (HS) a s modelom predpokladajúcim homogénnu distribúciu prúdu cez pásku. Zatiaľ čo experimentálne dáta priamej a nepriamej metodiky súhlasia, model s homogénnou distribúciou prúdu dáva jasne odlišné výsledky.
 14. Zistili sme, že v nami študovaných páskach je lokálny kritický prúd maximálny v strede Bi-2223/Ag pásky a smerom k okraju výrazne klesá.
 15. Rozpracovaná technika mapovania magnetického poľa nad supravodivými vzorkami je podľa nášho názoru veľmi vhodným doplnkom k charakterizácii supravodivých vzoriek popri integrálnych technikách. Na rozdiel od integrálnych techník (meranie I-V charakteristík na určitej dĺžke, meranie strát) umožňuje detekovať poruchy a nerovnomernosti štruktúry vzoriek, ktoré môžu výrazne ovplyvňovať chovanie sa vzorky a spôsobiť značné rozdiely medzi meraním a výpočtami.

Experimenty uvedené v tejto práci boli realizované v rámci projektov:

- FA 8655-03-1-3082, U.S. Air Force
- ASTRA, European Union, contract ENK6-CT-2002-8065.

5 Prínos práce pre ďalší rozvoj vedy a techniky

Hlavné prínosy prezentovanej práce sa dajú zhrnúť do nasledovných bodov:

- vypracovanie bezkontaktnej metodiky pre charakterizáciu VTS pásovk v oblasti AC magnetických polí pomocou Hallových sond (určovanie I-V charakteristík, meranie magnetických profilov a hysterézných slučiek) predstavuje silný nástroj, pomocou ktorého je možné určovať lokálne nehomogenity a lokálnu distribúciu prúdu indukovaného vo VTS páske vystavenej pôsobeniu AC externého poľa pri rôznych frekvenciách
- je možné detekovať homogenitu študovaných parametrov pozdĺž vzorky, čo predstavuje veľmi dôležitú informáciu pre zdokonalenie technológie prípravy dlhých vodičov, ktoré sú potrebné pre aplikácie
- bezkontaktná charakterizácia je cenná tým, že supravodivú pásku je možné podrobiť ďalším technologickým operáciám, čo nie je možné po namontovaní kontaktov
- touto technikou dokážeme určovať nakoľko úspešný je proces separácie filamentov pri príprave filamentárnych vodičov, napr. pri technológii

prípravy pások s viacnásobne prepojenými filamentami, ktorý slúži na zlepšenie stability pásky a súčasné zníženie hysteréznych strát

- získané poznatky a metódy budú využité pri vývoji supravodiča na báze YBCO pre použitie v stridavých elektromagnetických poliach

Literatúra

- [1] ASC, Second Generation HTS Wire: An Assessment, http://www.amsuper.com/products/htsWire/documents/4122GWhitePaper_v5.pdf
- [2] Ron Feenstra, A. A. Gapud, D. K. Christen, E. D. Specht, J. D. Budai, A. Goyal, F. A. List, L. Heatherly, P. M. Martin, D. M. Kroeger, ExsituBaF2process: Issues and Prospects of HighIcThick YBCO Coatings Thickness dependence of Jc, 2003 Wire Development Workshop, Session IV: Thick YBCO Film Growth January 21-22, St. Petersburg, Florida
- [3] Anderson. J., Parrell, J.A., Polák, M., and Larbalestier, D.: Determination of irreversibility field variations in mono- and multifilamentary (Bi, Pb)2Sr2Ca2Cu3Ox tapes by transport current methods, Applied Physics Lett. 71 (1997) 3892-4
- [4] Oberly Ch. O., Long L., Rhoads G. L., Carr W. J. Jr., ac Loss analysis for superconducting generator armatures wound with subdivided Y-Ba-Cu-O coated tape, Cryogenics 41 (2001) 117-124
- [5] Levin, G. A. And Barnes, P.: Concept of Multiply Connected Superconducting Tapes
- [6] Naoyuki Amemiya, Satoshi Kasai, Keiji Yoda, Zhenan Jiang, George A Levin, Paul N Barnes and Charles E Oberly, Supercond. Sci. Technol. 17 (2004) 1464-1471
- [7] M. Polák, V. Windte, W. Schaurer, J. Reiner, A. Gurevich and H. Wühl, "Contactless measurement of voltage-current characteristics of high-Tc thin film superconductors," Physica C, vol. 174, 1991, pp. 14-22.
- [8] Polak M., Kremasky L, Demencik E., Wehler D., Kreiskott S., Moenter B., Polyanskii A., Larbalestier D.C., Critical Currents of Narrow YBCO Rings on Ni and LaAlO3 Substrates, EOARD contract F61775-01-WE027, ASC conference, Medison 2002
- [9] E Demenčík, M Polak, D Wehler and B Moenter: Magnetic field due to coupling currents for Y-Ba-Cu-O model multifilamentary conductors. In: Applied Superconductivity 2003. Proc. of the 6th EUCAS, Sorrento 2003. IoP Conf. Ser. No 181. Eds. A. Andreone et al. Bristol: IoP 2004. P. 2427-2433, poster presentation
- [10] Polak M., Demencik E., Jansak L., Mozola P., Aized D., Thieme C. L. H., Barnes P.N., Levin G.A.: AC Losses in YBCO coil, zaslané do APL, 2005

- [11] ten Haken B, van Eck H J N, ten Kate H H J Physica C 334 (2000) 163-167
- [12] Kovac P, Masti M, Lehtonen J, Kopera L, Kawano K, Abell S, Metz B and Dhalle M: Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 1-8
- [13] M. Polák, M. Majoroš, J. Kvitkovič, P. Kottman, P. Kováč, T. Melišek
“Magnetic field in the vicinity of BSCCO tapes carrying transport current,”
Cryogenics, vol. 34, 1994, pp. 805-808.
- [14] M Polak, E Usak, L Jansak, E Demencik, G A Levin, P N Barnes, D Wehler, B Moenter: Coupling losses and transverse resistivity of multifilament YBCO coated superconductors, 7th EUCAS, Wien 2005, poster presentation

6 Zoznam prác dizertanta, ktoré majú vzťah ku skúmanej problematike

Zoznam publikovaných prác

- [D1] L Frolek, **E Demenčík**: Measurement of AC profiles of magnetic field above HTSc tape using Hall probe technique with help of DAQ cards and triggering, IEEE Trans. Applied Supercond. **15** (2005) 3660-3663
- [D2] M Polák, J Kvitkovič, **E Demenčík**, L Janšák, P Mozola: Temperature of Bi-2223/Ag samples in the resistive section of I-V curves, Physica C 401 (2004) 160-164
- [D3] **E Demenčík**, M Polak, D Wehler and B Moenter: Magnetic field due to coupling currents for Y-Ba-Cu-O model multifilamentary conductors. In: Applied Superconductivity 2003. Proc. of the 6th EUCAS, Sorrento 2003. IoP Conf. Ser. No 181. Eds. A. Andreone et al. Bristol: IoP 2004. P. 2427-2433.
- [D4] L Frolek, **E Demenčík** and F Gömöry: AC magnetic field utilization in defect detection in HTSc tapes. In: Applied Superconductivity 2003. Proc. of the 6th EUCAS, Sorrento 2003. IoP Conf. Ser. No 181. Eds. A. Andreone et al. Bristol: IoP 2004. P. 2441-2445.
- [D5] M Polak, L Krempasky, **E Demenčík**, D Wehler, S Kreiskott, B Moenter, A Polyanskii and D C Larbalestier: Critical currents of narrow YBCO rings on Ni and LaAlO₃ substrates, IEEE Trans. on Applied Supercond. **13** (2003) 2595-2598.

Práce zaslané na publikovanie

- [D6] M Polak, **E Demencik**, L Jansak, P Mozola, D Aized, C L H Thieme, P N Barnes, G A Levin: AC Losses in YBCO coil, zaslané do APL, 2005
- [D7] M Polak, **E Demencik**, L Jansak, E Usak, P Mozola, C L H Thieme, D Aized, P N Barnes, G A Levin: Properties of a YBCO pancake coil operating with AC current at frequencies up to 1000 Hz, MT19 - 19th International Conference on Magnet Technology, Genova - ITALY, 2005, to be published as a special issue in 2006 IEEE Transactions on Applied Superconductivity.
- [D8] **E Demencik**, M Dhalle, H H J ten Kate and M Polak: The Current Distribution in Bi-2223/Ag HTS Conductors: Comparing Hall Probe and Magnetic Knife, 7th EUCAS, Wien 2005, zaslané do Journal of Physics: Conference Series (JPCS).
- [D9] M Polak, E Usak, L Jansak, **E Demencik**, G A Levin, P N Barnes, D Wehler, B Moenter: Coupling losses and transverse resistivity of multifilament YBCO coated superconductors, 7th EUCAS, Wien 2005, zaslané do Journal of Physics: Conference Series (JPCS).

Príspevky prezentované na konferenciách

- [D10] **E Demencik**, M Dhalle, H H J ten Kate and M Polak: The Current Distribution in Bi-2223/Ag HTS Conductors: Comparing Hall Probe and Magnetic Knife, 7th EUCAS, Wien 2005, poster presentation
- [D11] M Polak, E Usak, L Jansak, **E Demencik**, G A Levin, P N Barnes, D Wehler, B Moenter: Coupling losses and transverse resistivity of multifilament YBCO coated superconductors, 7th EUCAS, Wien 2005, poster presentation
- [D12] M Polak, **E Demencik**, L Jansak, E Usak, P Mozola, C L H Thieme, D Aized, P N Barnes, G A Levin: Properties of a YBCO pancake coil operating with AC current at frequencies up to 1000 Hz, MT19 - 19th International Conference on Magnet Technology, Genova - ITALY, 2005, poster presentation
- [D13] **E Demenčík**: Magnetic field profile in the vicinity of YBCO samples at higher frequencies of external AC magnetic fields, Workshop ASTRA, Bratislava, April 2004, oral presentation
- [D14] M Polák, L Krempaský, **E Demenčík**: Characterization of YBCO Thin Film Samples Using Hall Probe Contactless Measurements, Workshop ASTRA, Bratislava, April 2004, oral presentation
- [D15] **E Demenčík**, M Polak, D Wehler and B Moenter: Magnetic field due to coupling currents for Y-Ba-Cu-O model multifilamentary conductors. In: Applied Superconductivity 2003. Proc. of the 6th EUCAS, Sorrento 2003. IoP Conf. Ser. No 181. Eds. A. Andreone et al. Bristol: IoP 2004. P. 2427-2433, poster presentation
- [D16] L Frolek, **E Demenčík** and F Gömöry: AC magnetic field utilization in defect detection in HTSc tapes. In: Applied Superconductivity 2003. Proc. of the 6th

EUCAS, Sorrento 2003. IoP Conf. Ser. No 181. Eds. A. Andreone et al. Bristol: IoP 2004. P. 2441-2445, poster presentation

[D17] L Frolek, **E Demenčík**, M Polák and F Gömöry: Defects in superconducting tape visualized by Hall probe mapping in dynamic regime. In: Inter. Workshop on Electromagnetic Non Destructive Evaluation (ENDE). Saclay 2003, poster presentation

7 Ohlasy na publikované práce

Polák, M., Kvitkovič, J., **Demenčík, E.**, Janšák, L., and Mozola, P.: Temperature of Bi-2223/Ag samples in the resistive section of I-V curves, *Physica C* **401** (2004) 160-164.

1. Berger, K.: *IEEE Trans. Applied Supercond.* **15** (2005) 1508.
2. Yim, S.W.: *IEEE Trans. Applied Supercond.* **15** (2005) 2482.
3. Chovanec, F.: *Cryogenics* **45** (2005) 129.

8 Summary

New perspective High Temperature Superconductors (HTS), YBCO coated conductors which are referred to as second generation conductor, 2G tapes, achieve high critical current densities, J_c , of the order 10^6 A.cm⁻². They are designed to use in ultra-light generator application with working frequency 400 Hz and power of about 5 MW with the weight/power ratio about 0.05 kg/kW. The concept of multiply connected filaments, from reasons of hysteresis loss reduction and sample stabilizing, was investigated on selected samples.

The magnetic fields generated by currents induced in HTS tapes when exposed to external magnetic field. By miniature Hall probe sensors with active area of about 50 x 50 μ m. The z -component of the magnetic field, applied perpendicular to the broad face tape was measured locally in the distance down to 350 μ m from the tape surface.

First generation HTS conductors Bi-2223/Ag, referred to as 1G tapes, are currently highly developed and nowadays are available at long lengths of the order of 1000 m. They are used in various applications, like SuperConductive (SC) transformers, motors and cables. We used these tapes to determine lateral current distribution in a direct way using so called “magnetic knife” (MN), which is based on a strong suppression of local critical current by applying a strong magnetic field gradient.

The scope of this work is the study various YBCO and Bi-2223/Ag tapes with the emphasis on the detection of additional coupling currents, induced in tape exposed in AC external magnetic field, detect local inhomogeneities and determine local lateral current distribution in a direct or an indirect way, respectively.

A contact-less technique for tapes characterization, Hall probe (HP) technique, for higher electrical fields induced in tape, was adopted. Current-voltage relations from which critical current I_c and empirical n -exponent, characterizing the slope of the power dependence were determined for various YBCO tapes in a contact-less way enabling recuperative tape use. The local technique is a convenient alternative to integral techniques (transport current measurement, pick-up-coil loss measurement) providing a special benefit on the information including the local spatial inhomogeneities.

Additional coupling currents, induced in the tapes on Ni-W substrate exposed to AC external magnetic field, were detected by local magnetic profile measurements. By comparison of measured magnetic field profile with the model calculations, the approximate current distribution of coupling currents was determined. We found out that the current distribution across sample in central part is nearly linear from centre to tape edges.

By using the MN technique, we determined lateral current distributions in tapes with different filament lay-out architectures in a direct way. The direct and indirect experimental data were compared with the model assuming homogeneous current distribution. We found out that local current densities in Bi-2223/Ag tapes are maximal in the centre, while they fall down at tape edges. Experimental results were compared with the results obtained by an indirect, HP technique, and showed that real lateral current distributions differ from the model homogeneous one.