

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky,  
Slovenská Technická Univerzita v Bratislave**

Autoreferát dizertačnej práce

**Štúdium správania páskových vodičov na báze  
vysokoteplotných supravodičov pri prenose  
striedavého elektrického prúdu**

**Mgr. Boris Klinčok**

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae  
doctor v odbore 26-02-9 Teoretická elektrotechnika

**Bratislava 2007**



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

**Predkladateľ:** Mgr. Boris Klinčok

ELÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 841 01 Bratislava

**Školiteľ:** Ing. Fedor Gömöry, DrSc.

ELÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 841 01 Bratislava

**Oponenti:** Prof. Ing. Valéria Hrabovcová, PhD.

EF ŽU, Žilina

Ing. Mojmír Kollár, CSc.

EF FEI STU, Bratislava

Prof. Dr. Harald W. Weber

TU, Viedeň

Autoreferát bol odoslaný 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.

FEI STU

Ilkovičova 3, 81219 Bratislava

# 1 ÚVOD

Z dôvodu nárastu populácie vo veľkých mestách narastá spotreba elektrickej energie spolu s požiadavkami na jej prenos. Súčasné vedenia elektrickej energie majú obmedzenú prenosovú kapacitu, čo môže spôsobiť preťaženie elektrickej siete a výpadky elektrickej energie. Riešenie tohto problému pomocou káblov z klasických medených vodičov sa z dlhodobého hľadiska javí neudržateľné. Preto je nutné v blízkej budúcnosti prejsť k iným riešeniam. Jednou z ciest môže byť použitie supravodivých káblov. Toto riešenie prináša svoje výhody aj nevýhody. Jednou z výhod je vysoká prúdová hustota a tým pádom aj vysoká prenosová kapacita, ktorá je oproti medeným vodičom neporovnateľne vyššia. Z tohto dôvodu by bolo možné použiť už existujúce energetické kanály pre prenos elektrickej energie. Ďalšou výhodou sú oveľa nižšie energetické straty, čo pri vysokých energetických tokoch hrá významnú úlohu. Nevýhodou je nutnosť použiť chladiace zariadenie a súčasná vysoká cena samotných supravodivých vodičov. Hlavné cenový faktor hrá najdôležitejšiu rolu pri uplatnení supravodičov v praxi. Cena sa odvíja hlavne od použitého materiálu.

Od objavu supravodivosti H. K. Onnesom v roku 1911 bola supravodivosť preukázaná u viacerých materiálov. Vo všeobecnosti možno supravodiče rozdeliť do dvoch typov podľa ich správania sa v magnetickom poli. Sú to supravodiče prvého a druhého typu. Pre priemyselné použitie sú najvhodnejšie supravodiče druhého typu. U nich rozlišujeme viaceré fázy. Ak je vonkajšie magnetické pole nižšie ako tzv. dolná kritická hodnota  $H_{c1}$  supravodič je v takzvanom Meissnerovom stave. Ak sa hodnota vonkajšieho magnetického poľa väčšia ako  $H_{c1}$  ale menšia ako hodnota tzv. horná hodnota  $H_{c2}$ , supravodič je v takzvanom zmiešanom stave. Tu magnetické pole vniká do supravodiča vo forme magnetických tokotrubíc, kde v jadre tokotrubice je supravodivosť rozrušená. Tokotrubice sa navzájom odpudzujú a vytvárajú tak mriežku tokotrubíc. Ak súčasne aplikujeme transportný prúd, na mriežku tokotrubíc začne pôsobiť Lorentzova sila, ktorá uvedie celú mriežku do pohybu. Takýto pohyb

vyvoláva disipáciu energie. Preto je žiaduce, aby bola mriežka tokotrubíc zachytená na záchytných centrách. Tento záchyt sa v odbornej terminológii nazýva pinning. Veľkosť pinningovej sily, ktorá pôsobí proti Lorentzovej sile tak určuje kritický prúd  $I_c$  supravodiča. Pre aplikácie sú najdôležitejšie takzvané tvrdé supravodiče druhého typu, ktoré majú silný pinning a vysoké kritické prúdy. Pri poli  $H_{c2}$  je hustota tokotrubíc taká vysoká, že tokotrubice vyplňajú celý objem supravodiča a supravodivý stav je rozrušený.

V roku 1986 boli objavené takzvané vysokoteplotné supravodiče. Z nich najpoužívanejšie sú materiály  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$  (BSSCO alebo Bi-2223) s  $T_c \approx 110$  K a  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) s  $T_c \approx 90$  K. Vysoká kritická teplota týchto materiálov umožňuje použiť na ich chladenie tekutý dusík, čo predstavuje omnoho ekonomickejšie hospodárenie. Nevýhodou týchto materiálov je ich štruktúra. Jedná sa o keramické materiály s vysokou anizotropiou, čo neumožňuje ich spracovanie do formy vodiča pomocou klasických metód.

Takzvanú 1. generáciu VTS vodičov tvoria BSSCO/Ag pásy. Jedná sa o supravodivé BSSCO vlákna tzv. filameny, ktoré sú uzatvorené v striebornej matrici. Proces prípravy takýchto pásov pozostáva z viacerých krokov zahŕňajúcich viacnásobné žihanie a valcovanie. Tieto procesy majú za úlohu vytvoriť z prekurzorov supravodivú fázu Bi-2223 a zabezpečiť tak správnu textúru zŕn zo supravodivého materiálu. To je potrebné na dosiahnutie vysokých kritických prúdov. Táto metóda je veľmi dobre etablovaná a umožňuje produkovať vodiče dĺžky niekoľko kilometrov. Problémom však zostáva cena, ktorá je vysoká kvôli komplikovanej príprave a nutnosti použitia striebornej matrice.

2. generáciou VTS vodičov nazývame tzv. YBCO coated vodiče. Jedná sa o tenkú supravodivú vrstvu, ktorá je deponovaná na kovovej textúrovanej páske. Pre epitaxný rast vrstvy na podložke sa používajú ešte tzv. bufferové vrstvy. Kvalita takto vyrobených pásov závisí hlavne od kvality supravodivej vrstvy, ktorú je možné deponovať viacerými metódami. Najlepšie výsledky boli namerané na vrstvách pripravených pomocou laserovej pulznej depozície. Tá je však cenovo náročná, preto je snaha zdokonaľiť proces tzv. sol-gelovej metódy, kde sa vrstva nanáša z prekurzorového kúpeľa a prechádza procesom žihania. Tento proces môže pri zdokonalení znížiť cenu YBCO coated vodičov na úroveň, kedy začnú byť konkurencieschopné.

Ako vidieť, oba typy supravodivých pásov prechádzajú počas procesu prípravy viacerými technologickými krokmi. Tieto kroky ovplyvňujú výslednú kvalitu pásky. Z hľadiska aplikácie supravodivých pásov pri prenose striedavého elektrického prúdu treba brať do úvahy tzv. striedavé straty. Ich veľkosť sa odvíja od vlastností supravodivých pásov, ich tvaru, homogenity a iných. Je dôležité poznať vplyv týchto vlastností na striedavé straty a vedieť ich tak znížiť pomocou modifikovania procesu prípravy supravodivých pásov.

## 2 CIELE PRÁCE

Pre výpočet striedavých strát v supravodivej páske je dôležité poznať prúdové rozloženie v supravodiči v každom momente cyklu striedavého prúdu. Analytický výpočet prúdového rozloženia je možný len v istých špeciálnych prípadoch. Pre reálne supravodivé pásky je potrebné často prikrčiť k numerickým metódam, ktoré dokážu započítať oveľa viac vlastností pásov ako základné analytické modely.

Hlavným cieľom práce je preto nájsť taký súbor parametrov reprezentujúcich vlastnosti reálneho vodiča z vysokoteplotného supravodiča, ktorý by umožnil popísať proces prenosu striedavého prúdu a s ním spojený tvar napätového signálu, s uvážením nasledovných skutočností:

- a) geometrické usporiadanie supravodivej fázy vo vodiči
- b) strmosť voltampérovej charakteristiky supravodivého materiálu
- c) závislosť kritickej prúdovej hustoty od zložiek vektora lokálneho magnetického poľa
- d) nehomogenita supravodivých vlastností v priereze vodiča

## 3 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Analytické riešenie prúdového rozloženia v supravodiči je možné vypočítať len v priblížení tzv. modelu kritickeho stavu vypracovaného C. P. Beanom v roku 1962 [1]. V tomto modeli sa predpokladá, že lokálna prúdová hustota je rovná buď kritickej hustote  $\pm j_c$ , alebo rovná nule. V rámci tohto modelu boli vypočítané

prúdové rozloženia pre supravodič eliptického prierezu [2] a pre nekonečne tenký supravodivý pásik [3]. Pre ostatné prípady je nutné použiť numerické metódy. V rámci teórie modelu kritického stavu je možné použiť metódu minimalizácie variácie magnetickej energie (MMEV) [4] pre výpočet prúdového rozloženia v supravodiči obdĺžnikového alebo iného prierezu.

Model kritického stavu neberie do úvahy tzv. plazenie tokotrubíc, ktoré vzniká v dôsledku nenulovej teploty. To má za následok, že napäťovo prúdová charakteristika supravodiča nie je skoková ako v modeli kritického stavu, ale dá sa skôr aproximovať pomocou mocninového zákona tvaru:

$$E = E_c \left( \frac{j}{j_c} \right)^n \quad (1)$$

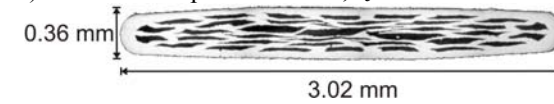
Kde  $E_c = 10^{-4}$  V/m a parameter  $n$  určuje strmosť napäťovo prúdovej charakteristiky. Tento vzťah je používaný v mnohých numerických metódach na popis supravodivých vlastností materiálu. V súčasnosti sú často používané tzv. metódy konečných prvkov. Tie sú implementované v špecializovaných softvéroch, čo vyžaduje investície vo forme ich zakúpenia. V tejto práci je vzťah (1) implementovaný pomocou tzv. Brandtovej metódy [5].

Použitím numerických metód boli v minulosti vypočítané striedavé straty v supravodiči rôznych prierezov a so započítaním nehomogenít a  $j_c(B)$  závislosti [6]. V tejto práci sa však na rozdiel od ostatných prác kladie dôraz na analýzu celého napäťového signálu, ktorý je indukovaný v meracej slučke supravodiča vedúceho striedavý elektrický prúd. Je to najmä z dôvodu, že iba analýzou striedavých strát nie je možné odlíšiť vplyv jednotlivých vlastností supravodiča. Tvar napäťového signálu a jeho Fourierových zložiek pre jednoduché geometrie boli analyzované v prácach [7,8]

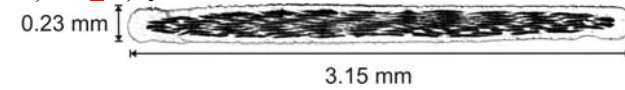
## 4 EXPERIMENTÁLNE METÓDY

Vypočítané prúdové rozdelenia a tvary napäťových signálov v supravodivých páskach boli porovnané nameranými dátami pre tri typy BSSCO/Ag pásov s rôznymi prierezmi a kritickými prúdmi  $I_c$ .

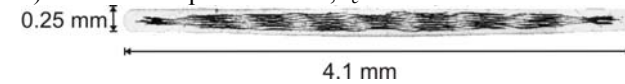
a) Australian Superconductors,  $I_c \approx 39A$



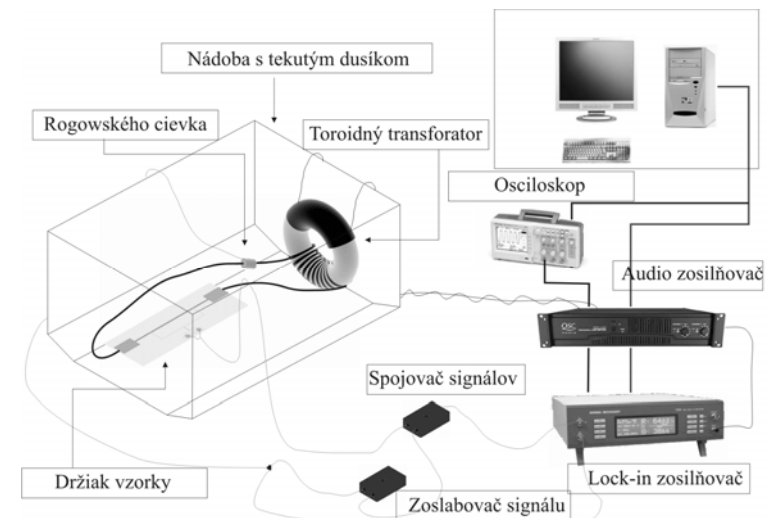
b) Trithor,  $I_c \approx 49A$



c) American Superconductor,  $I_c \approx 120A$



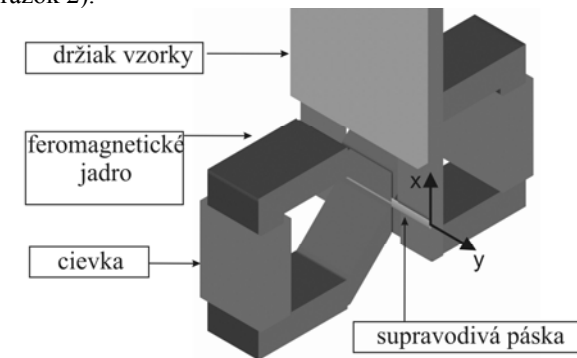
Vlastnosti BSSCO/Ag pásov boli skúmané pomocou rôznych experimentálnych metód. Všetky merania boli uskutočnené pri teplote 77 K. Tvar napätového signálu a jeho Fourierove zložky boli merané pomocou aparatury znázornenej na obrázku (1).



Obrázok (1) – schéma merania



Signál z mernej slučky bol analyzovaný pomocou lock-in zosilňovača, ktorý zároveň zaznamenal jeho Fourierove komponenty. Zosilnený signál z lock-inu bol ďalej zaznamenaný pomocou osciloskopu. Na všetkých typoch pásov bola zmeraná  $I_c(B)$  závislosť v kolmom a paralelnom poli. Na určenie nehomogenity rozloženia kritickej prúdovej hustoty v supravodivej páske bola použitá metóda magnetického noža [9]. Táto metóda je založená na meraniach kritickeho prúdu pásy v špeciálnej cievke (Obrázok 2).



Obrázok 2 – Cievka magnetického noža

Takáto cievka potláča supravodivosť vo väčšej časti supravodivej pásy a tak umožňuje merať kritickej prúd len vo veľmi úzkej oblasti. Následne sa páska posúva vo vertikálnom smere. To umožňuje zmerať priečne rozloženie kritickej prúdovej hustoty ( $j_c(x)$ ) v supravodiči.

## 5 POROVNANIE VÝSLEDKOV NUMERICKÝCH SIMULÁCIÍ S EXPERIMENTAMI

Na vyhodnotenie nameraných výsledkov tvaru napätového signálu a jeho Fourierových zložiek boli použité viaceré numerické metódy. Pomocou výpočtového prostredia FEMLAB bola z

výsledkov meraní  $I_c(B)$  závislosti určená lokálna závislosť kritickej prúdovej hodnoty od magnetického poľa ( $j_c(B)$  závislosť). Tá spolu s rozložením kritickej prúdovej hustoty  $j_c(x)$  slúžila ako vstupný parameter pre numerické simulácie rozloženia prúdovej hustoty pomocou Brandtovej metódy. Ďalší vstupný parameter bola geometria pásky a rozloženie supravodivých vlákien v priereze supravodiča. Nameraný tvar napätového signálu ako aj jeho Fourierove zložky boli následne porovnávané s výsledkami numerických simulácií. Cieľ bol pomocou zahrnutia čo najväčšieho počtu parametrov do simulácie sa čo najviac priblížiť k nameraným dátam.

## 6 ZÁVERY SKÚMANIA

Pomocou analytických a numerických metód boli vypočítané prúdové rozloženia v rôznych modelových prípadoch transportu striedavého prúdu v supravodiči. Boli porovnané jednak prúdové rozloženia, ale aj napätové signály a jeho Fourierove komponenty. Bol skúmaný vplyv rôznych prierezov supravodiča na jeho prúdové rozloženie, ako aj vplyv parametra  $n$  v napätovo prúdovej charakteristike, vplyv  $j_c(B)$  závislosti a vplyv nehomogenity kritickej prúdovej hustoty v supravodiči. Bola vypracovaná numerická metóda, ktorá umožňuje vypočítať prúdové rozloženie v supravodiči ľubovoľného prierezu. Výsledky numerických simulácií ukázali, že na detailné popísanie supravodivej pásky pomocou numerického modelu, je nutne uvažovať nielen detailne rozloženie supravodivých vlákien ale treba uvažovať nehomogénne rozloženie prúdovej hustoty ako aj jej závislosť od hodnoty magnetického poľa. Po zahrnutí všetkých relevantných vlastností supravodiča do numerických simulácií boli výsledky vo veľmi dobrej zhode s nameranými hodnotami Fourierových zložiek napätového signálu.

### Literatúra

- [1] Bean C P 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 250.
- [2] Norris W T 1970 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **3** 489.

- [3] Brandt E H, Indenbom M 1993 *Phys. Rev. B* **48** 12893.
- [4] Pardo E, Sanchez A, Navau C 2003 *Phys. Rev. B* **67** 104517.
- [5] Brandt E H 1996 *Phys. Rev. B* **54** 4246.
- [6] Kim Y B, Hempstead C F, Strnad A R 1962 *Phys. Rev. Lett.* **9** 306.
- [7] Gomory F, Tebano R, Souc J, et al. 2003 *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY* **13**: 3622
- [8] Tebano R, Gomory F, 2003 *CENTRAL EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS* **1** 246
- [9] ten Haken B, van Eck H J N, ten Kate H H J 2000 *Physica C* **334** 163.

## 7 HLAVNÉ VÝSLEDKY

Hlavné výsledky predkladanej dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov.

1. Bol vytvorený nový analytický model supravodiča s valcovou diskontinuitou. Jedná sa o model supravodiča s kruhovým prierezom, v ktorom je časť prierezu formy medzikružia nesupravodivá. Tento model v sebe zahŕňa základnú črtu viacvláknových supravodičov, kde supravodivé oblasti sa striedajú s nesupravodivými. Pomocou tohto modelu sa podarilo vysvetliť niektoré javy pozorované na reálnych vzorkách, ako je napríklad zmena znamienka niektorých Fourierových komponentov.
2. Bol ukázaný vplyv prierezu supravodiča na tvar signálu a na Fourierove komponenty vrátane stratovej zložky, ako aj vplyv parametra  $n$ ,  $j_c(B)$  závislosti a vplyv nehomogenity kritickej prúdovej hustoty v supravodiči. Bolo ukázané, že

vplyv týchto parametrov možno rozlíšiť pomocou analýzy Fourierových komponentov.

3. Bol vysvetlený posun napäťového signálu voči aplikovanému prúdu, ktorý bol pravidelne pozorovaný na reálnych vzorkách. Bolo ukázané, že tento posun závisí od parametra  $n$  a preto ho nie je možné vysvetliť v rámci modelu kritického stavu.
4. Experimentálne namerané dáta sa výborne zhodovali s numerickými simuláciami, ale až vtedy keď boli v simuláciách zarátané všetky relevantné vlastnosti supravodiča. Týmto spôsobom bolo ukázané, že na podrobný popis javu kedy supravodič vedie striedavý prúd je potrebné brať do úvahy čo najviac vlastností supravodiča.
5. V rámci numerických metód bola vyvinutá technika, kedy je obrázok skutočného prierezu analyzovaný pomocou softvéru a týmto spôsobom je možné pri simuláciách počítať s presným rozložením filamentov. Táto technika výrazne prispela k zlepšeniu zhody medzi vypočítanými a nameranými dátami. Ukázalo sa, že presné rozloženie filamentov v BSSCO/Ag páskach niektorých prípadoch podstatne ovplyvňuje tvar napäťového signálu a jeho Fourierových zložiek.
6. Výpočtom strát v supravodivom kábli bol ukázaný vplyv veľkosti medzier medzi jednotlivými páskami. Výpočet bol porovnaný s meraním na supravodivom YBCO coated kábli. Simulované dáta boli v dobrej zhode s nameranými dátami.

## **8 Zoznam prác dizertanta, ktoré majú vzťah ku skúmanej problematike.**

Klinčok, B. and Gömöry, F.: *Study of AC transport in superconducting wire with the help of pick-up coils*, Czechoslov. J. Phys. **54** (2004) Suppl. D501-505.

Klinčok, B., Gömöry, F., and Pardo, E.: *The voltage signal on a superconducting wire in AC transport*, Supercond. Sci Technol. **18** (2005) 694-700.

Klinčok, B. and Gömöry, F.: *Influence of gaps in monolayer superconducting cable on AC losses*, J. Phys.: Conf. Ser. **43** (2006) 897-900.

Vojenčiak, M., Šouc, J., Ceballos, J.M., Klinčok, B., Gömöry, F., Pardo, E., and Grilli, F.: *Losses in Bi-2223/Ag tape at simultaneous action of AC transport and AC magnetic field shifted in phase*, J. Phys.: Conf. Ser. **43** (2006) 63-66.

Gömöry, F. and Klinčok, B.: *Self-field critical current of a conductor with an elliptical cross-section*, Supercond. Sci Technol. **19** (2006) 732-737.

Gömöry, F., Šouc, J., Vojenčiak, M., Seiler, E., Klinčok, B., Ceballos, J.M., Pardo, E., Sanchez, A., Navau, C., Farinon, S., and Fabbriatore, P.: *Predicting AC loss in practical superconductors*, Supercond. Sci Technol. **19** (2006) S60-S66.

Vojenčiak, M., Šouc, J., Ceballos, J.M., Gömöry, F., Klinčok, B., Pardo, E., and Grilli, F.: *Study of ac loss in Bi-2223/Ag tape under the simultaneous action of ac transport current and ac magnetic field shifted in phase*, Supercond. Sci Technol. **19** (2006) 397-404.

Rostila, L., Lehtonen, J., Masti, M., Lallouet, N., Saugrain, J.-M., Allais, A., Schippl, K., Schmidt, F., Balog, G., Marot, G., Ravex, A., Usoskin, A., Gömöry, F., Klinčok, B., Šouc, J., and Freyhardt, H.C.: *Design of a 30 m long 1 kV YBCO cable*, Supercond. Sci Technol. **19** (2006) 418-422.

Klinčok B., Gömöry F., Dhalle M. :*Study of BSSCO/Ag tapes with the help of voltage signal analysis*", presented at Applied Superconductivity Conference 2006, Settle, USA, akceptované v IEEE Transaction on Applied Superconductivity.

Gömöry F, Šouc J, Seiler E., B. Klinčok, M. Vojenčiak, A. K. M. Alamgir, Z. Han, Ch. Gu, “Performance improvement of superconducting tapes due to ferromagnetic cover on edges”, presented at Applied Superconductivity Conference 2006, Settle, USA, accepted in IEEE Transaction on Applied Superconductivity

## 9 Ohlasy na práce dizertanta

Klinčok, B., Gömöry, F., and Pardo, E.: *The voltage signal on a superconducting wire in AC transport*, Supercond. Sci Technol. **18** (2005) 694-700.

1. Meerovich, V., Sokolovsky, V., Prighozin, L., and Rozman, D., Dynamic response of HTS composite tapes to pulse currents. Supercond. Sci Technol. **19** (2006) 267-275.

Gömöry, F., Šouc, J., Vojenčiak, M., Seiler, E., Klinčok, B., Ceballos, J.M., Pardo, E., Sanchez, A., Navau, C., Farinon, S., and Fabbriatore, P.: *Predicting AC loss in practical superconductors*, Supercond. Sci Technol. **19** (2006) 60-66.

1. Tominaka, T., *Calculation using the circuit equation for the current and field distribution of type II superconductors*, Supercond. Sci Technol. **19** (2006) 1040-1046.
2. Lu, R., Vallejo, R., N., Fischer, D., W., and Wu, J., Z., *Development of textured MgO templates on nonmetallic flexible ceraflex*, Applied Physics Letters **89** (2006) Art. No. 132505

## Summary

The utilization of high temperatures superconductors in electric power application depends on several factors. One of them is the optimization of the superconducting power transmission cables in term of the energetic losses. Due to the application of the alternating current in the power transmission, the AC hysteretic losses are the issue of prime importance. Any superconducting cable is assembled from superconducting tapes. The total hysteretic losses of the cable depend on superconducting properties of the tapes and their arrangement on the cable former. Both aspects are studied in this thesis. The superconducting property of the tape is affected by several factors: the shape of the superconductor's cross-section, the  $j_c(B)$  dependence, the homogeneity of critical current density in the superconductor are those most important. From the optimization point of view it is difficult to distinguish the effect of the mentioned factors on the AC property of the superconductor by studying just the AC-loss curve. Therefore we decided to study the whole voltage signal that appears during the AC transport. The voltage signal was studied by the analysis of the voltage waveform shape and by the Fourier analysis.

The influence of the superconductor's cross-section on the current distribution was studied in the frame of the critical state model (CMS) and by the model considering the power-law smooth current voltage characteristic. The already existing analytical models of current distribution for superconductor with the circular or elliptical cross-section and for the infinitely thin superconducting strip were used to calculate the voltage of AC transport in such conductors. For the first time not only the AC-losses was compared but also the waveforms of the voltage signal and its Fourier components.

A new analytical model for the superconductor with cylindrical discontinuity was developed. This model should represent the existence of discontinuities in superconducting multifilament tapes. The results of this model show the significant features like the step in the voltage waveform or the sign change of some Fourier components. This measurable effect visible on real tapes can not be explained by simple models assuming a continuous cross-section.

The influence of the cross-section on the current distribution in superconductor was studied by the minimization of magnetic energy variation (MMEV) method the Brandt's method that takes into account smooth current voltage characteristic. Comparing the results acquired by these two methods we can see several similarities and differences. The main difference between the results calculated by the Brandt's method and results acquired in the frame of the critical state model is the voltage waveforms calculated by the Brandt's method are shifted in time in comparison with that acquired in CSM. This shift depends on the value of the  $n$  parameter of the current-voltage characteristic and was measured in all experiments on HTS tapes. The slope of the cosine Fourier components is changing in the same way for the results of both methods. This means that if the aspect ratio of the rectangular cross-section is increased the slope of the cosine harmonics change from the second to the third power. This was verified by the calculation of the current distribution for the rectangular cross-section for aspect ratio equal to 1000. The problem of high aspect ratios in numerical simulations is very actual due to the application of the second generation YBCO coated tapes. With a help of the Brandt's method we were able to calculate the current distribution taking into account the dependence of the current density on the magnetic field ( $j_c(B)$  dependence) and the lateral distribution of critical current density in the tape. Here the results shows that the voltage signal and its higher harmonics are affected in a unique way what can be used to distinguish these to effect. One can say that the study of all Fourier harmonics can be helpful to evaluate the contribution of each superconductor's property on the AC-losses behavior. The simulation method was proved by the comparison with the measured data from three tapes manufactured by different producers. For each tape the current distribution for three different geometries replacing the real arrangement of filaments was calculated: the rectangular cross-section, the elliptical cross-section and the distribution of the filaments acquired from the image of the tape's cross-section. These cross-sections were chosen to see if it is enough to calculate with elementary geometrical models or detailed multifilament structure has to be considered. The results of calculation for the models with real filament distribution are in good qualitative agreement with measured data.



But if we want to have precise numerical model for the experimental data for the Fourier components of the voltage signal the  $j_c(B)$  dependence and the lateral distribution of the critical current density in the tape has to be considered. If we include these parameters into calculation the result of the voltage signal and its harmonics are with very good agreement with the measured one. Then due to the fact that the signal waveform and all harmonics follow the numerical simulation we can say that the influence of all the relevant factors was taken into consideration.

At the end the Brandt's method was applied to calculate the current distribution in the superconducting cable. The effect of the gaps between the superconducting tapes in the cable arrangement on AC loss was evaluated. The results of calculation for the AC-losses were compared with the measurements on short YBCO cable model. Results show that the simple monoblock model can not explain the slope of the measured data for higher currents. After considering that the cable consists of tapes with certain properties the simulations gave good agreement with the measurements.