

Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky  
Slovenskej technickej univerzity

**Mgr. Mykola Solovyov**

## **Striedavé straty v pokrytých vodičoch**

Autoreferát dizertačnej práce

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

Bratislava, 2011

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Elektrotechnickom ústave Slovenskej akadémie vied v Bratislave

Predkladateľ: Mgr. Mykola Solovyov  
EIÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava

Školiteľ: Doc, Ing. Fedor Gömöry DrSc  
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

Výskum supravodivých materiálov a vývoj technológie ich výroby umožňuje široké aplikačne možnosti. Napríklad silnoprúdová elektrotechnika už dnes aktívne využíva rôzne supravodivé prvky, ako supravodivé káble, obmedzovače prúdu, supravodivé transformátory, motory a magnety pre vysoké polia. Využitie supravodivých materiálov umožňuje zvyšovať prúdovú kapacitu elektrických vedení v husto osídlených aglomeráciách bez toho aby sa museli rozširovať existujúce rozvody elektrického vedenia – jednoducho sa medené káble nahradia supravodivými. Supravodivé motory a transformátory majú oproti klasickým vyššiu účinnosť. Supravodivé obmedzovače prúdu predstavujú nový typ zariadenia, ktorého rýchlosť a účinnosť ochrany sa nedá dosiahnuť tradičnými zariadeniami. Ďalšou výhodou supravodivých materiálov oproti klasickým medeným vodičom sú omnoho menšie energetické straty, aj keď sa započíta energia na chladenie supravodiča. Na druhej strane, použitie supravodičov je nateraz spojené s omnoho vyššími finančnými nákladmi oproti klasickým vodičom – tvorí ich zatiaľ príliš vysoká cena supravodivých pásov, k tomu ešte treba pridať chladiace zariadenie, odbornú montáž a obsluhu. Čiže cenový faktor je najväčšie obmedzenie uplatnenia supravodičov v praxi.

Za uplynulých 100 rokov od objavu supravodivosti H. K. Onnesom (1911) sa supravodivé materiály neustále vyvíjajú. Z hľadiska správania v magnetickom poli ich môžeme rozdeliť do dvoch skupín – supravodiče 1. a 2. druhu. Supravodiče 1. druhu sú väčšinou jednoduché kovy, ako Pb, La, Ta, Hg, Sn a ďalšie, nenašli praktické použitie v silnoprúdovej elektrotechnike. Dôvodom je veľmi nízka hodnota aplikovaného magnetického poľa – kritické pole,  $H_c$ , pri ktorej supravodivý stav vymizne. Na rozdiel od supravodičov 1. druhu, pre supravodiče 2. druhu sú definované dve kritické polia –  $H_{c1}$  a  $H_{c2}$ . Keď aplikované magnetické pole je nižšie ako  $H_{c1}$  ( $H_c$ ), správanie supravodičov 1. a 2. druhu je rovnaké – v tenkej povrchovej vrstve supravodiča tečie tieniaci prúd, ktorý bráni prenikaniu magnetického poľa do objemu supravodiča – takzvaný

Meissenerov stav. Pri prekročení hodnoty  $H_{c1}$ , a až do hodnoty  $H_{c2}$  u supravodičov 2. druhu supravodivý stav pretrváva ako takzvaný zmiešaný stav. V tomto stave magnetické pole vniká do objemu supravodiča vo forme magnetických tokotrubíc, ktorých jadro je v normálnom (nesupravodivom) stave. Pri pretekaní elektrického prúdu takýmto suprovodičom pôsobí na tokotrubice Lorentzova sila, ktorá sa snaží ich uviesť do pohybu. Ak má supravodič viesť prúd je nutné, aby mriežka tokotrubíc bola zachytená na záchytných centrách. Tento jav sa nazýva pinning magnetického toku. Čím väčšia záchytná (pinigová) sila pôsobí proti Lorentzovej sile, tým väčší je kritický prúd supravodiča –  $I_c$ . Z praktického hľadiska najzaujímavejšie sú takzvané tvrdé supravodiče so silným piningom a vysokými kritickými prúdmi. Pri hodnote aplikovaného pola  $H_{c2}$  sa celý objem supravodiča zaplní tokotrubicami a supravodivý stav zanikne.

Ďalším dôležitým parametrom supravodiveho materiálu je teplota, pri ktorej sa ešte zachováva supravodivý stav –  $T_c$ . Jedny z najroširenejších materiálov pre supravodive magnety sú NbTi a Nb<sub>3</sub>Sn, ktoré majú tu výhodu že sú to zliatiny a na ich výrobu stačia klasické metalurgické postupy. Nevýhodou týchto materiálov sú nízke kritické teploty – 9.8 K respektívne 18.2 K, vyžadujúce chladenie tekutým héliom. Materiály, objavené v roku 1986 – takzvané vysokoteplotné supravodiče (VTS), umožňujú rádovo znižovať náklady na prevádzku supravodivých zariadení, pretože na ich chladenie stačí použiť tekutý dusík. Najširšie uplatnenie z tých materiálov majú BSCCO-2212 (Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) s  $T_c \approx 80$  K a BSCCO-2223 (Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>10</sub>) s  $T_c \approx 105$  K, a YBCO (Y<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>) s  $T_c \approx 95$  K. Nevýhodou týchto materiálov je ich keramická štruktúra, čo zapríčiňuje komplikácie pri výrobe samotných vodičov a zariadení na ich základe. 1. generácia VTS vodičov sú BSCCO/Ag pásy, pozostávajúci z supravodivých vlákien v striebornej matici. Takéto pásy sa pripravujú viacnásobným valcovaním a žíhaním s cieľom vytvoriť z prekursorov supravodivú keramickú fázu a zabezpečiť správnu

textúru zfn. Táto technológia dnes umožňuje produkovať vysokokvalitné, niekoľkokilometrové supravodivé pásy. Cena takýchto vodičov však je stále vysoká kvôli veľkému množstvu použitého striebra. 2. generácia VTS vodičov predpokladá deponovanie mikrónovej vrstvy supravodivého materiálu (najčastejšie YBCO) na špeciálne tvarovanú kovovú podložku. Podložka býva pokrytá niekoľkými buferovými vrstvami, ktoré majú zabezpečiť epitaxný rast supravodivého pokrytia. Predpokladá sa, že vývoj technológie výroby takýchto pásov umožní podstatne znížiť cenu VTS vodiča pre koncového užívateľa. Už dnes cena tzv. pokrytého vodiča (v angličtine coated conductor, skratka CC), pozostávajúceho z kovovej podložky pokrytej vrstvou YBCO, je porovnateľná s cenou BISCCO pásov.

Inou špecifikou použitia supravodičov pre silnoprúdové aplikácie, kde pracujeme väčšinou so striedavým prúdom, sú striedavé straty. Pre jednosmerný prúd supravodič sa chová ako ideálny vodič, odpor ktorého je nulový, pri prechode striedavého prúdu ale dochádza k disipácii energie, alebo takzvaným striedavým stratám. Hlavnou zložkou striedavých strat v supravodiči sú takzvané hysterézne straty. Pod vplyvom Lorentzovej sily v supravodičoch 2. druhu dochádza k pohybu tokotrubíc, a pri striedavom prúde smer pôsobenia Lorencovej sily a smer pohybu tokotrubíc sa mení. A keďže tokotrubice sú zachytené na piningových centrách, ich pohyb potrebuje dodatočnú energiu, tým dochádza k hysteréze a k stratám energie.

## 1. Ciele práce a súčasťný stav problematiky

Striedavé straty sú dané parametrami supravodivého vodiča – homogenitou, kritickou prúdovou hustotou, závislosťou kritickej prúdovej hustoty od magnetického poľa. Na druhej strane veľmi dôležitú úlohu hrá usporiadanie supravodičov. Napríklad, pri bifilárnom usporiadaní supravodivých pásov môžu byť straty o niekoľko radov nižšie ako v jednotlivých pásoch. Vzhľadom nato je pre

návrh supravodivých zariadení dôležité vedieť odhadnúť dopredu straty a usporiadať supravodiče tak, aby tieto boli minimálne.

Analytický výpočet strát je možný iba pre obmedzené množstvo geometrií a nezahŕňa mnohé vlastnosti reálnych pásov. Zároveň, experimenty častokrát ukazujú veľkú odchýlku analyticky predpovedaných striedavých strát a strát, nameraných na reálnych páskach. Táto odchýlka sa niekedy dá zmenšiť zahrnutím závislosti kritickej prúdovej hustoty od magnetického poľa. Inou pravdepodobnou príčinou takejto nezhody je nehomogénnosť supravodiča. V prípade pokrytých vodičov znamená, že vlastnosti supravodivej vrstvy sa menia napríklad po dĺžke alebo aj v priereze pásky.

Cieľom predkladanej dizertačnej práce bolo preskúmať vplyv nehomogenity supravodičov na striedavé straty v páskach ako aj na profil magnetického poľa nad povrchom pásky prenášajúcej elektrický prúd. Pre tento účel bola prispôbená a vylepšená aparatúra na mapovanie magnetického poľa nad povrchom pásky s pomocou Hallovej sondy. Bol vypracovaný postup merania a numerické metódy, ktoré umožnili skúmanie homogenity supravodivých pásov na základe údajov o nameranom rozložení poľa. Okrem toho bol vypracovaný postup na zahŕňanie nehomogenity do výpočtového modelu správania supravodiča pri prenose striedavého prúdu.

Ako bolo uvedené vyššie, existujú analytické metódy na výpočet striedavých strát v supravodiči. Jedným z takýchto modelov je model Norrisa pre tenký pásik alebo pásik s eliptickým prierezom supravodiča [1]. Takéto modely aj teraz sa používajú na predbežnú analýzu nameraných strát ako dobrý referenčný bod. Zahrnutie ďalších parametrov supravodivej pásky ale vyžaduje použitie numerické metódy. To môže byť metóda minimalizácie variácie magnetickej energie (MMEV) [2] alebo numericky model na základe tak zvanej metódy konečných prvkov. Druhú možnosť obyčajne poskytujú komerčne softvéry, ako napríklad Comsol Multiphysics [3], ktorý bol použitý pre túto prácu. Zatiaľ tieto softvéry neobsahujú

knižnice na definovanie supravodivého stavu, preto je nutné samostatne zadefinovať rovnice, ktoré by tento stav popisovali. V dizertačnej práci je použitá takzvaná definícia na základe vektorového potenciálu [4], ktorá bola predložená Campbelom [5]. Tato definícia vyplýva z Maxvelových rovníc:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j}$$

a spočíva v tom, že všade za hranicou supravodiča sa definuje nulová prúdová hustota, a v samotnom supravodiči prúdová hustota je definovaná rozdielom vektorových potenciálov:

$$j_s(x, y) = j_c \tanh \left( \frac{A_p(x, y) - A_z(x, y)}{A_{norm}} \right)$$

kde:  $j_s$  – prúdová hustota v supravodiči,  $j_c$  – kritická prúdová hustota,  $A_p$  – rozloženie vektorového potenciálu v predošlý moment času (v prípade začiatku výpočtu  $A_p = 0$ ),  $A_z$  – aktuálne rozloženie vektorového potenciálu,  $A_{norm}$  – konštanta, ktorá zadáva prudkosť prechodu od kladnej hodnoty prúdovej hustoty do zápornej. Akceptovaním  $j_c \neq const$  a  $j_c = f(x, y)$ , sa dá zaviesť nehomogénnosť do modelu. V mojej práci som sa zaoberal vplyvom nehomogenity v priečnom priereze pásky. Táto sa môže zadávať buď analyticky, alebo môže byť definovaná v konečnom počte bodov. Ako jednoduchšia možnosť bolo zvolené zadanie nehomogenity v parciálnom lineárnom priblížení s minimálnym počtom bodov. V takomto prípade na určitom úseku pásky v jej strednej časti je maximálna kritická prúdová hustota, ktorá za hranicami tohoto úseku symetricky a lineárne klesá ku okrajom pásky. Už takýto jednoduchý tvar funkcie nehomogénnosti po šírke pásky vie dobre zosúladiť vypočítanú krivku strát a reálne merania [6-8]. V tejto práci však bola vyvinutá aj pokročilejšia metóda, kde nehomogénnosť sa určuje priamo z rozloženia magnetického poľa nad supravodivou páskou, nameraného pri prechode kritického prúdu v externom magnetickom poli. Takýto postup umožňuje získať detailnejší obraz o nehomogénnosti pásky. Podarilo sa nám dosiahnuť stav, keď

výsledky z jedného druhu merania vedia poskytnúť dostatočnú informáciu na interpretáciu výsledkov iného druhu merania, čo svedčí o dôveryhodnosti nájdených parametrov použitých modelov.

## 2. Experimentálne metódy

Experimentálne výsledky boli získané na väčšom počte vzoriek YBCO pásov od firmy SuperPower, pripravených na nemagnetickej podložke. Skúšané pásy sa líšili predovšetkým šírkou, ktorá bola 4, 6 a 12 mm. Jedna časť pásov mala supravodivú vrstvu pokrytú iba 2  $\mu\text{m}$  vrstvou striebra, druhá časť bola výrobcom dodatočne obalená 20  $\mu\text{m}$  stabilizačnou vrstvou medi. Kritický prúd pásov vo vlastnom poli sa menil od 96 A pre niektoré 4 mm pásy až do 450 A pre 12 mm pásku.

Pre všetky vzorky bolo zmapované rozloženie magnetického poľa nad povrchom pásky pri rôznych aplikovaných vonkajších magnetických poliach a rôznych transportných prúdoch. Taktiež na týchto páskach boli zmerané transportné striedavé straty pre frekvencie 36, 72 a 144 Hz.

Z nameraných rozložení magnetického poľa sa určovali parametre nehomogenít pásov metódou porovnania nameraného a vypočítaného rozloženia magnetického poľa. Okrem toho nehomogenita pásky sa určovala na základe rozloženia prúdovej hustoty, získanej riešením inverznej úlohy s pomocou Fourierovej transformácie. Udaje o nehomogenite, získané týmito dvoma spôsobmi sa potom použili vo výpočte striedavých strát. Výsledok výpočtu strát sa porovnával so stratami nameranými na tých istých vzorkach, z čoho sa dala posúdiť relevantnosť získaných údajov o nehomogenite.



### 3. Závery skúmania

Na zaklade informácie o rozložení magnetického poľa nad povrchom skúmanej pásky boli určene detailnejšie parametre supravodivej vrstvy, menovite hodnota kritickej prúdovej hustoty a jej závislosť od pozície po šírke pásky. Pomocou numerických výpočtov, do ktorých boli zahrnuté získané parametre nehomogenity, boli vypočítané straty v supravodivých páskach a porovnané s výsledkami meraní strát na týchto páskach. Bol skúmaný vplyv podmienok ( prúd prenášaný páskou, aplikované magnetické pole) na hľadané parametre nehomogenity a vypracovaný postup, umožňujúci dosiahnuť veľmi dobrú spoľahlivosť určenia nehomogenity kritickej prúdovej hustoty z rozloženia magnetického poľa nad páskou.

Výsledky numerických simulácií tiež ukázali, že v prípade páskových vodičov pokrytých tenkou supravodivou vrstvou je vplyv nehomogenity na striedavé straty omnoho dôležitejší než vplyv  $j_c(B)$  závislosti, ktorý pre zjednodušenie numerického modelu je možné vynechať. Taktiež bol analyzovaný vplyv hustoty výpočtovej mriežky, na ktorej sa uskutočňujú výpočty metódou konečných prvkov, na presnosť výpočtu striedavých strát a na základe toho sa upravil výpočtový modul. Optimalizácia výpočtovej mriežky umožňuje ušetriť značné množstvo procesorového času. Po zahrnutí získaných parametrov nehomogenity a optimalizácii numerických výpočtov vypočítané straty boli vo veľmi dobrej zhode s nameranými hodnotami.

#### *Literatúra*

- [1] Norris W T 1970 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **3** 489.
- [2] Pardo E, Sanchez A, Navau C 2003 *Phys. Rev. B* **67** 104517.
- [3] <http://www.comsol.com>
- [4] Gömöry, F., Vojenčiak, M., Pardo, E., Solovyov, M., and Šouc, J.: AC losses in coated conductors, *Supercond. Sci Technol.* **23** (2010) 034012.

- [5] Campbel A. M. 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** 292
- [6] O. Tsukamoto, "AC losses in a type II superconductor strip with inhomogeneous critical current distribution," 2005 *Supercond. Sci Technol.* vol. 18, pp. 596-605, May 2005.
- [7] N. Amemiya, O. Maruyama, M. Mori, N. Kashima, T. Watanabe, S. Nagaya, Y. Shiohara, "Lateral  $J_c$  distribution of YBCO coated conductors fabricated by IBAD/MOCVD process," *Physica C* vol. 445-448, pp. 712-716, October 2006
- [8] Grilli, F. Brambilla, R. Martini, L. "Modeling High-Temperature Superconducting Tapes by Means of Edge Finite Elements," *Applied Superconductivity*, vol. 17, issue: 2, pp. 3155 – 3158, July 2007

## 4. Hlavné výsledky

Hlavné výsledky predkladanej dizertačnej práce možno zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Bol dokázaný významný vplyv nehomogenity supravodivej vrstvy na striedavé straty v páskových vodičoch 2. generácie na báze vysokoteplotných supravodičov – tzv. pokrytých vodičov (coated conductors). Tento vplyv bol dôkladne preskúmaný pre pásiky na nemagnetickej podložke.
2. Bolo vyvinuté zariadenie na skúmanie nehomogenít pomocou mapovania magnetického poľa nad páskou prenášajúcou elektrický prúd. Analýza hlavných chýb merania a ich odstránenie umožnili podstatné vylepšenie vierohodnosti získaných výsledkov.
3. Bola vyvinutá numerická metóda, v ktorej sa s použitím spätnej Fourierovej transformácie nameraných rozložení magnetickeho poľa rieši inverzný problém rozloženia prúdovej hustoty. Z

rozloženia prúdovej hustoty v páske sa dá určiť nehomogenita vlastností supravodivej vrstvy.

4. Zistila sa výborná zhoda experimentálnych dát pre striedavé straty s numerickými simuláciami, pokiaľ sa merania uskutočnili na tej istej vzorke, pre ktorú bol nájdený profil nehomogenity. To už neplatilo pri porovnaní výsledkov na rôznych vzorkách (z tej istej páske), čo pravdepodobne svedčí o nehomogenite supravodivej vrstvy pozdĺž páske.
5. Výpočet strát v supravodivom bifilári ukázal výrazné zlepšenie zhody po zaradení profilu nehomogenity do numerickeho modelu. Supravodivý bifilár predstavuje v porovnaní s jednotlivou páskou komplexnejšiu štruktúru, ktorej výpočet vyžaduje poznanie väčšieho počtu parametrov, ako napríklad hrúbka izolačnej vrstvy alebo vzájomné prekrytie a natočenie pásek. Tiež chyba merania strát môže byť väčšia kvôli podstatne nižšej úrovni meraného stratového signálu. Neprekvapuje preto, že zhoda vypočítaných a nameraných hodnôt nebola taká dokonalá ako v prípade samostatnej páske.
6. V rámci dizertačnej práce bola tiež ukázaná možnosť využitia metódy na vyhľadávanie bodových defektov v supravodivých páskach.

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

Solovyov, M., Vojenčiak, M., and Gömöry, F.: Magnetic field mapping above the superconducting tape with Ni-covered edges, IEEE Trans. Applied Supercond. 19 (2009) 3049-3052.

Solovyov, M., Polák, M., Vojenčiak, M., and Gömöry, F.: Improving the numerical model for high temperature coated conductors using the Hall-probe measurement, J. Phys.: Conf. Series 234 (2010) 022035.

Gömöry, F., Vojenčiak, M., Pardo, E., Solovyov, M., and Šouc, J.: AC losses in coated conductors, *Supercond. Sci Technol.* 23 (2010) 034012.

Solovyov, M. and Gömöry, F.: Numerical simulation of magnetic flux penetration and AC loss in HTSC coated conductor tapes, *J. Supercond. Novel Magn.* 24 (2011) 69-74.

Solovyov, M. and Gömöry, F.: Study of YBCO tape non-uniformity based on the AC loss and the magnetic field distribution in current transport, *IEEE Trans. Applied Supercond.* 21 (2011) 3277-3280.

## 6. Ohlasy na práce dizertanta

Solovyov, M., Vojenčiak, M., and Gömöry, F.: Magnetic field mapping above the superconducting tape with Ni-covered edges, *IEEE Trans. Applied Supercond.* 19 (2009) 3049-3052.

1. Thakur, K.P.: *Physica C* 471 (2011) 42.

Gömöry, F., Vojenčiak, M., Pardo, E., Solovyov, M., and Šouc, J.: AC losses in coated conductors, *Supercond. Sci Technol.* 23 (2010) 034012.

1. Lakshmi, L.S.: *Supercond. Sci Technol.* 23 (2010) 085009.
2. Ashworth, S.P.: *Supercond. Sci Technol.* 23 (2010) 095009.
3. Ainslie, M.D.: *Supercond. Sci Technol.* 24 (2011) 045005.
4. Ahn, M.C.: *IEEE Trans. Applied Supercond.* 21 (2011) 1250.
5. Ainslie, M.D.: *IEEE Trans. Applied Supercond.* 21 (2011) 3265.
6. Genenko, Y. A.: *Applied Phys. Lett.* 98 (2011) 152508.
7. Furman, G.: *J. Supercond. Novel Magnetism* 24 (2011) 1045.
8. Ainslie, M.D.: *COMPEL* 30 (2011) 762.

## Summary

Nowadays, when superconducting wires are commercially available, the power applications on their basis can be developed. The electric power industry already works on such superconducting devices as: power transmission cables, fault current limiters, superconducting transformers, motors and high field magnets. Superconducting power transmission cables allow increasing current transition capability in populous regions, using already existing cable channels. Superconducting transformers, motors and generators have higher efficiency and reduced mass and dimensions. Moreover, the superconducting fault current limiters are a new type of devices, with speed and efficiency that could not be reached by classical equipment. Other advantage of superconducting wires is lower energy losses compared to copper wires. However, a practical use of superconductors is still encountered with much higher price – this is the main limitation factor of their applications.

From the practical point of view, for power applications is more preferable to use the so called “high temperature superconductors” (HTS). These are type II superconductors and their critical temperature is above 77 K (the boiling temperature of liquid nitrogen). This thesis is focused on second generation of HTS wires, also called coated conductor (CC) tapes. These tapes require less silver in their productions than the first generation, therefore their price could be lower in longer perspective.

Other issue important for superconducting power application is the energy losses in superconductors. Main part of power applications works with AC current. In difference to DC current transfer, when superconducting materials behave as ideal conductors, in AC mode the power dissipation in superconductors is observable. This phenomenon is called the AC losses, and main part of it is explained by hysteresis losses in superconductor. This is caused by the fluxoids movement in response on the operating AC magnetic field. The value of AC losses depends on the properties of superconducting tape – its uniformity, dependence of the critical

current density ( $j_c$ ) of superconductor on the magnetic field ( $j_c(B)$ ). The final arrangement of superconducting wires in a device is also very important and can significantly reduce or increase AC losses with respect to single tape. By an optimal arrangement of superconducting tapes the AC losses can be reduced by several orders of magnitude.

Analytical prediction of AC losses is possible only for limited number of geometries. Therefore, in practice the numerical models are used for design of superconducting devices with low AC losses. Numerical simulations also allow us to include in the model additional details of superconducting tape properties and make results more realistic. In the current thesis the influence of the uniformity of HTS tape on the AC losses in case of current transportation is studied. It was found that a non-uniformity of superconducting layer is dominant factor which causes a deviation of measured AC losses from the theoretical prediction.

Because of the high dependence of superconducting tape electromagnetic properties on its homogeneity we developed the procedure to study the non-uniformity in a rigorous way. The method is based on magnetic field mapping above the superconducting tape in different conditions. We observed, that better results are obtained when tape is placed into an external magnetic field, large enough to reduce the influence of  $j_c(B)$  dependence. On the other hand this field should to leave the superconducting tape's current transport capability on satisfactory level. A typical range of applied magnetic field which was used in experiments is about 100 – 170 mT for 4 – 12 mm wide superconducting tapes. This field will be subtracted from the measured one to obtain the pure signal from superconducting sample. Another condition of uniformity investigation is the applied transport current, flowing through the HTS tape during the magnetic field measurement. The value of this current should be close to the critical one at actual applied magnetic field.

One way of utilizing the data from measured magnetic field is to compare it with magnetic field calculated for possible profiles of non-uniformity and select the case with the best agreement. For such comparison we used the profiles, obtained by piecewise linear decreasing of critical current density of CC tape across the width, symmetrical in relation to the tape centre. This shape is described by two parameters –  $h_x$  and  $h_y$ . First parameter indicates the point, where critical current density of the tape is no more uniform and starts to decrease. Second parameter defines the lower level of  $j_c$  degradation on the tape edges. Even this simplified characteristic of non-uniformity allows increasing the agreement between measured AC losses and calculation that involved such non-uniformity.

More advanced method to extract the information about tape uniformity from measured magnetic field profile is solving the inversion problem. For this purpose was utilized the procedure based on the Fourier transforms. Non-uniformity determination in this case is performed in several steps. Magnetic field measurement procedure is the same as was described before. By inversion solution for measured field the probable distribution of the current density in the superconducting layer is generated. To reduce residual influence of the  $j_c(B)$  dependence the values of the obtained current density are symmetrised with respect to the tape centre by averaging the values in left and right parts of the obtained profile. For further use the obtained profile is normalized to 1 at maximal value.

Both methods of the non-uniformity representation in the numeric model for AC loss calculation show good agreement with experimental results. They were tested on the CC tapes on non-magnetic substrate produced by SuperPower®. Tested tapes have different widths – 4 mm, 6 mm and 12 mm and different critical currents, in range 90 – 450 A. Some of tapes were covered only by 2  $\mu\text{m}$  thick silver layer, another were covered also by 20  $\mu\text{m}$  copper stabilization layer. Finally, for the 12 mm wide tape AC losses was measured and compared with calculated one not only for single tape, but also for antiparallel (bifilar) arrangement. The results of numeric

simulation and experiment show that using obtained non-uniformity profiles allows to significantly improving numeric model in this case as well.

Hall-probe apparatus, used and improved during this work can be employed not only for non-uniformity investigation. In this thesis is shown another possible application – Hall-probe defectoscopy. For such purpose the magnetic field scanning range covers not only a single line above the tape, but larger area in plane of the tape surface. From the recorded magnetic field it is possible to recognize currents in the superconducting layer. In case of tape defect the normal regular structure of the current flowing is distorted and the place of defect is well localizable. Such measurement can be utilized for some superconducting devices because with large probability the quench of the superconducting layer would start in the region of defect.