Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky

Slovenskej technickej univerzity

Mgr. Ján Kováč

Štúdium striedavých strát v MgB2 supravodičoch

Autoreferát dizertačnej práce

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

Bratislava, 2014

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

Predkladateľ:	Mgr. Ján Kováč ElÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 84104 Bratislava
Školiteľ:I	Ing. Ján Šouc CSc. EIÚ SAV, Dúbravská cesta 9, 84104 Bratislava
Oponenti:	RNDr. Miloš Jirsa, DrSc. FzÚ AV ČR, Praha
	Doc. Ing. Pavol Rafajdus, PhD. EF ŽU, Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 8.4.2015 Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa: 29.4.2015 o 11:00 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, 81219 Bratislava

Úvod

Cieľom práce je experimentálne štúdium striedavých strát v supravodičoch vplyv zloženia. štruktúry a geometrie MgB_{2} supravodivých MgB₂ kompozitov s cieľom minimalizácie striedavých strát. Supravodivé materiály sú v súčasnosti používané v rôznych formách v mnohých praktických aplikáciách. Napriek unikátnej schopnosti supravodičov viesť vysoké prúdové hustoty v jednosmernom režime bez akejkoľvek disipácie, v prípade striedavých režimov, keď supravodičom preteká striedavý prúd a/alebo je vystavený pôsobeniu striedavého vonkajšieho magnetického poľa. dochádza v supravodičoch ai supravodivých kompozitoch k energetickým stratám. Keďže výsledkom každého disipatívneho procesu je vznik tepla a súčasne pre udržanie supravodiča v supravodivom stave je nutné jeho chladenie pod jeho kritickú teplotu, striedavé straty môžu významne ovplyvniť prevádzkové náklady daného zariadenia. Z tohto hľadiska je nevyhnutný vývoj supravodivých kompozitov s cieľom minimalizovať striedavé straty.

Objavenie supravodivosti v MgB₂ v roku 2001 vzbudilo v odbornej verejnosti veľký záujem, vzhľadom na viaceré nesporné výhody, ktoré robia tento materiál perspektívnym v porovnaní s ostatnými doteraz známymi supravodičmi. Oproti s takzvaným nízkoteplotným supravodičom (Nb₃Sn, NbTi) je najväčšou výhodou MgB₂ jeho relatívne vysoká kritická teplota 39 K, umožňujúca jeho chladenie pomocou cryo-coolerov, čo znamená významné zlacnenie a zjednodušenie v porovnaní s chladením pomocou tekutého hélia. Na druhej strane lacná technológia prípravy MgB₂ ako aj možnosť jeho produkcie vo veľkých dĺžkach (km) predstavuje veľkú výhodu v porovnaní s vysokoteplotnými supravodičmi (YBCO, BiSCCO). Napriek veľkej pozornosti vyvolanej spomínanými výhodami MgB2 supravodičov je do dnešných dní oblasť ich striedavých strát nie celkom prebádanou kapitolou; obzvlášť v rozsahu teplôt predpokladaných pre použitie MgB₂ v praxi (≈20 K). Zohľadnením tohto stavu je hlavným cieľom tejto dizertačnej práce experimentálne štúdium striedavých strát v MgB₂ kompozitoch práve v tejto oblasti teplôt.

V teoretickej časti tejto práce sú stručne zhrnuté základné vlastnosti supravodivých materiálov, pričom je špeciálne venovaná pozornosť supravodičom v striedavom režime a striedavým stratám. Pre experimentálne štúdium striedavých strát v oblastiach teplôt v ktorých má MgB₂ spomínané komparatívne výhody v porovnaní s ostatnými supravodivými materiálmi bolo nevyhnutné vyvinúť špeciálny merací systém umožňujúci meranie magnetizačných strát s vysokou presnosťou a citlivosťou v teplotnom rozsahu od 15.5 K po kritickú teplotu MgB₂ v čo najväčšom rozsahu magnetického poľa. Pre skúmanie vplyvu jednotlivých zložiek participujúcich na celkových magnetizačných stratách je taktiež potrebné meranie frekvenčných závislosti striedavých strát. Vývoj špeciálneho meracieho systému predstavuje samostatnú kapitolu experimentálnej časti predloženej práce. S ohľadom na jednotlivé procesy podieľajúce sa na celkových magnetizačných stratách sú experimentálne výsledky rozdelené do niekoľkých skupín. Vplyv kritickej prúdovej hustoty a rozmeru filamentárneho jadra na hysterézne straty supravodiča je študovaný na sérií monofilamentárnych vzoriek. Keďže prítomnosť väzbových strát je u monofilamentov vylúčená, je na nich možné pozorovať tiež vplyv kovových častí kompozitu. Vznik väzbových strát v multifilamentárnom vodiči ako aj ich eliminácia pomocou twistovania, respektíve vplyv twistovania na degradáciu transportných vlastností boli študované na sérií 30-žilových MgB₂ drôtov. Efekt odporovej bariéry v okolí filamentov bol skúmaný na vzorkách s Nb, Ti a NbTi bariérami. Pozornosť je venovaná taktiež stratám v MgB₂ kábloch a vplyvu káblovania na väzbové straty kompozitu. Poslednú sériu skúmaných vzoriek tvoria takzvané MgB2 supravodiče druhej generácie vyrobené pomocou "Inter Metal Diffusion" (IMD) technológie, ktoré v porovnaní s predošlými sériami vzoriek vyrobenými pomocou "Power In Tube" (PIT) technológie, vykazujú menšiu náchylnosť na degradáciu transportných vlastností vplyvom mechanického namáhania pri procese twisovania.

Vývoj meracieho systému

Pre účel experimentálneho štúdia striedavých magnetizačných strát v supravodiči je potrebné umiestnenie vzorky striedavom vonkajšom

magnetickom poli homogénnom v jej okolí. Predpokladaná prevádzková teplota v praktických aplikáciách supravodiča MgB₂ je v okolí 20 K. Keďže straty supravodiča výrazne závisia od jeho kritickej prúdovej hustoty, ktorá je súčasne funkciou teploty, pre presné meranie strát je nutne zabezpečiť stabilnú teplotu vzorky s vysokou presnosťou. Pre úplné preniknutie vzorky magnetickým poľom (obzvlášť v prípade vzoriek s veľmi vysokou kritickou prúdovou hustotou) je potrebné striedavé magnetické pole s relatívne vysokou amplitúdou, čo vyžaduje magnety (ako zdroj magnetického poľa) trvalo zaťažiteľné vysokými prúdmi bez ich nežiaduceho zahrievania a mechanických vibrácií, čo by mohlo mať za následok skreslenie meraných výsledkov. Pre odlíšenie frekvenčne závislých strát vírivými prúdmi a väzbových strát od hysteréznych strát, respektíve pre ich detailnejšie skúmanie je potrebné meranie magnetizačných strát pri rôznych frekvenciách vonkajšieho magnetického poľa. Všetky spomínané parametre špecifikujú požiadavky na merací systém, ktorého vývoj predstavuje významnú časť predloženej práce. Na obrázku 1 je schematicky znázornená zostava meracej aparatúry.



Obr.1 Schematický nákres zostavy meracej aparatúry.

Na chladene vzorky je použitý dvojstupňový cryo-cooler Sumitomo CNA-11 s výkonom druhého stupňa 0.15W pri teplote 4.2K. Pre dosiahnutie čo najnižšej teploty vzorky je nutné zabezpečiť dobrý tepelný kontakt medzi vzorkou a druhým stupňom cryocoolera, eliminovať ohrievanie vzorky tepelným žiarením ako aj vedenie tepla prostredím v okolí vzorky. Najväčšou komplikáciou pri vývoji meracej aparatúry bolo vylúčenie použitia akýchkoľvek elektricky vodivých a/alebo magnetických materiálov v blízkosti meranej vzorky. Z tohto dôvodu sme vyvinuli špeciálnu vákuovú nádobu vyrobenú zo sklotextitu impregnovanú polyuretánovým lakom pre zabezpečenie tesnosti. Na lepené spoje vystavené kontrakciám pri teplotnom cyklovaní bol použitý Stycast[®] 2850FT. Eliminácia zahrievania držiaka vzorky je zabezpečená pomocou systému tepelného tienenia. Dôležitým prvkom tepelného tienenia je tieniaci štít vyrobený z tenkého medeného plechu tepelne ukotvený o prvý stupeň cryo-coolera , chladený na teplotu 60 K tieniaci druhý stupeň cryocoolera. Vonkajšiu stranu tepelného štítu chráni obal Superizolacie[®] v niekoľkých vrstvách vzájomne oddelených pomocou tenkej sklotextitovej textílie. Pomocou superizolácie je tienený taktiež prvý stupeň ako aj samotný držiak vzorky a tepelné prívody zabezpečujúce jeho tepelné pripojenie ku chladiacej hlave cryo-coolera.

Jedným s najdôležitejších prvkov meracieho systému je držiak vzorky zabezpečujúci jej uchytenie a chladenie. Pre tento účel je nutné použiť materiál s čo najvyššou tepelnou vodivosťou. Ako však už bolo spomenuté, kvôli magnetizačným meraniam je prakticky vylúčené použitie akýchkoľvek kovových prvkov. Z tohto dôvodu sme držiak vzorky vyhotovili zo špeciálneho keramického materiálu Aluminium nitrid BNP-2. Jedná sa o mechanicky obrábateľný materiál s tepelnou vodivosťou 92.6 Wm⁻¹K⁻¹ at 300 K. Meraná vzorka s maximálnym priemerom 2 mm a dĺžkou 70 mm je umiestnená vo vnútri keramického masívu s osou kolmo na smer vonkajšieho magnetického poľa. Dobrý tepelný kontakt držiaka so vzorkou je zabezpečený pomocou tepelne vodivej pasty. CernoxTM SD teplotný senzor je umiestnený v bezprostrednej blízkosti vzorky taktiež vo vnútri držiaka, čím je zabezpečené presné meranie teploty vzorky. Pre stabilizáciu teploty slúži vyhrievacie vinutie umiestnené po obvode držiaka vo vzdialenosti 60 mm od meranej vzorky, napájane pomocou softvérom riadeného zdroja Agilent U3606A. Ovládací softvér bol vytvorený v prostredí LabWiev a komunikácia s meracími zariadeniami je zabezpečená pomocou GPIB zbernice. Presnosť stabilizácie teploty dosahuje 10⁻² K. Obrázok 2 ukazuje schematický nákres chladiaceho systému a) detail držiaka vzorky b) a držiak vzorky chránený superizoláciou c).



Obr. 2: a) Schematický nákres chladiaceho systému b) Detail držiaku s vyznačením jednotlivých častí 1. BNP-2 Aluminium nitrid 2. umiestnenie vzorky 3. teplomer 4. vyhrievacie vinutie 5. tepelný prívod c) držiak vzorky chránený superizopláciou

Pre samotné meranie magnetizačných strát bol vyvinutý systém meracích magnetov založený na originálnej "callibration free" metóde [1] s viacerými modifikáciami zvyšujúcimi presnosť a citlivosť meraní. Táto meracia metóda je založená na dvoch identických magnetických systémoch; meracieho a kompenzačného elektromagnetu, z ktorých každý obsahuje okrem samotného vinutia magnetu paralelne vinuté meracie vinutie. Elektromagnety sú zapojené do série, čím je zabezpečený rovnaký prúd v oboch vinutiach a súčasne rovnaký magnetický tok cez obe meracie cievky. Tie sú navzájom zapojené anti-sériovo aby sa výsledné indukované napätie oboch cievok vzájomne odčítavalo. Takto vyváženým systémom je možné priamo merať magnetizačné straty vzorky ako súčin prúdu budiaceho externé magnetické pole a stratovej zložky napätia na meracom vinutí. V ideálnom prípade sa v prázdnom systéme indukované napätie z oboch meracích vinutí anuluje úplne, čo však v praxi nieje dosiahnuteľné a vyžaduje vysokú geometrickú presnosť zhotovenia. Okrem faktu, že rozsah vstupu meracieho Lock-In zosilňovača je určený veľkosťou napätia na meracom vinutí môže veľká induktívna časť spôsobiť taktiež významnú chybu v meranej stratovej časti signálu aj pri malej nepresnosti nastavenia fázy. Z tohto dôvodu bolo do meracieho systému pridané ďalšie kompenzačné vinutie spojené sériovo s meracou a kompenzačnou cievkou s nastaviteľnou pozíciou vo vertikálnom smere. Týmto spôsobom je možné precízne nastavenie zvyškovej induktívnej časti meraného signálu. Pomocou tejto modifikácie bola dosiahnutá kompenzácia indukovaného napätia o 6 rádov. Ďalším nežiaducim javom je takzvané stratové pozadie, t.i. magnetizačné straty detekované meracím svstémom. ktoré nepochádzajú od meranej vzorky, ale predstavujú vlastné straty v meracom systéme (vinutie, prúdové prívody atď.), respektíve predmetov v jeho blízkosti (kovové časti chladiaceho systému, zariadenia laboratória, železobetónovej výstuže budovy atď.). Pri samotnom meraní je stratové pozadie najprv zmerané samostatne (bez vzorky alebo so vzorkou zohriatou nad $T_{\rm c}$) a od následného merania so vzorkou odčítané. V prípade, že hodnota strát pozadia je porovnateľná alebo dokonca podstatne vyššia než užitočný meraný signál, môže pozadie skresliť alebo znemožniť meranie obzvlášť v prípadoch vzoriek s veľmi nízkymi striedavými stratami. Preto je nutné pozadie v maximálnej možnej miere eliminovať. Pre tento účel sme použili ďalšie kompenzačné vinutie umiestnené nad kompenzačným magnetom, pričom ako kompenzačný magnet je použitý ten s menšími vlastnými stratami. Presným nastavením sériového odporu tohto vinutia kompenzačného ie možné nastaviť dodatočné straty kompenzačného systému. Týmto spôsobom je možné znížiť stratové pozadie o viac ako jeden rád. Ďalším nežiaducim prvkom je taktiež nadmerné zahrievanie vinutí magnetov pri ich vysokom prúdovom zaťažení ako aj ich mechanické vibrácie, ktoré predstavujú dodatočné straty energie dodávanej zdrojom a detegované meracím vinutím. S ohľadom na tieto skutočnosti boli navrhnuté a vyrobené meracie magnety obsahujúce medené vinutie z lanka pozostávajúceho zo samostatne izolovaných tenkých vodičov kvôli eliminácií strát vírivými prúdmi. Pre zabezpečenie odvodu tepla obsahujú magnety prietokové kanáliky medzi vrstvami vinutie kvôli chladeniu pomocou tekutého dusíka v celom objeme magnetu. Mechanická pevnosť je zabezpečená pomocou masívneho sklotextitového skeletu a Stycast[®]2850FT impregnáciou pri ich navíjaní. Pre napájanie magnetov slúžia dva prúdové zdroje pre rôzne režimy merania. Pre merania pri vysokých amplitúdach vonkajšieho poľa (0.1T) respektíve pre frekvencie poľa vyššie ako 72 Hz je ako napájací zdroj používaný 5 kW audio zosilňovač s pre tento účel navrhnutým prúdovým transformátorom a systémom kapacitných kompenzácií s nastaviteľnou hodnotou. Pre frekvencie nižšie ako 72 Hz slúži zdroj Kepco BOP 2020ML určený špeciálne pre induktívne záťaže. V oboch prípadoch ako generátor meraného signálu slúži dvojkanálový dvojfázový Lock-in zosilňovač Signal Recovery 7265. Prúd v magnetoch je meraný Rogovského cievkou, signál z ktorej slúži taktiež na nastavenie fázy Lock-in zosilňovača. Prvý kanál Lock-In zosilňovača zabezpečuje okrem merania prúdu aj fázovanie vnútorného súradnicového systému, čo umožňuje pomocou druhého kanálu získať priamo amplitúdu induktívnej časti signálu z meracieho vinutia ako *x*-ovú zložku a stratovú časť ako zložku v smere *y*. Celý merací systém je plne automatizovaný a ovládaný pomocou softvéru LabWiev. Na obrázku 3a je detail meracích magnetov, 3b zobrazuje celú meraciu aparatúru [2].



Obr 3: a) Detail meracích magnetoch b) aparatúra pre meranie striedavých magnetizačných strát pri rôznej teplote.

Experimenálne výsledky

Na celkových striedavých magnetizačných stratách v supravodivých kompozitoch sa vo všeobecnosti podieľajú 3 základné procesy: i) hysterézne straty v supravodivých filamentoch ii) väzbové straty v dôsledku indukovaných prúdov v slučkách tvorených supravodivými filamentami a uzavretých cez odporovú bariéru iii) straty v dôsledku

vírivých prúdov vo kovových častiach kompozitu [3]. Pre sledovanie vplyvu konštrukcie kompozitných MgB2 drôtov na ich striedavé magnetizačné straty boli skúmané vzorky rozdelené do niekoľkých kategórií. Keďže u monofilamentárnych supravodičov nevznikajú väzbové straty, je u nich možné skúmanie vplyvu rozmeru filamentu a prúdovej hustoty na hysterézne straty, respektíve vplyv kovových častí kompozitu. Pre skúmanie väzbových strát a efektu "decouplingu" vplyvom twistovania bola študovaná séria 30-žilových drôtov s rôznym krokom twistu, pričom bol uvažovaný aj efekt degradácie transportných vlastnosti vplyvom twistovania. Eliminácia väzbových strát pomocou odporovej bariéry bola skúmaná na netwistovaných vzorkách s Nb, Ti a NbTi bariérou. Samostatná pozornosť bola venovaná stratám v MgB2 kábloch. Poslednou sériou meraných vzoriek boli multifilamentárne twistované MgB₂ drôty tzv. druhej generácie vyrobené pomocou IMD (inter metal diffusion) technológie. Na rozdiel od prvej série twistovaných multifilamentov vyrobenej pomocou PIT (power in tube) technológie, MgB₂ druhej generácie dosahuje okrem vyšších prúdových hustôt aj lepšiu odolnosť voči mechanickému namáhaniu. Z toho vyplýva možnosť twistovania na kratšie dĺžky twistu bez nežiaducej degradácie transportných vlastností.

Magnetizačné straty v monofilamentárny MgB2 drôtoch

Magnetizačné straty v monofilamentárny MgB_2 drôtoch boli skúmané na sérií piatich vzoriek, ktorých rezy sú znázornené na obrázku 4.



Obr 4: Rezy skúmaných monofilamentárnych MgB₂drôtov a) 1F-1, 1F-2 b) 1F-3 c) 1F-4 d) 1F-5.

Dvojica prvých skúmaných vzoriek **1F-1, 1F-2** obsahovala okrem Nb bariéry GlidCop AL60 stabilizáciu a vzorky mali odlišnú prúdovú hustotu z dôvodu rozdielneho procesu žíhania [4]. Na obrázku 5a sú merané teplotné závislosti magnetizačných strát pre rôzne amplitúdy vonkajšieho

poľa a frekvencie 72 a 144 Hz. Pri nízkych teplotách (18 K) dosahujú merané straty veľmi nízke hodnoty, čo je spôsobené vysokou prúdovou hustotou J_c pri tak nízkej teplote a prakticky takmer úplnému vytlačeniu poľa z objemu supravodiča. So zvyšujúcou sa teplotou kritická prúdová hustota supravodiča J_c klesá, preto s ohľadom na model kritického stavu tieniace prúdy tečú v čoraz väčšom objeme supravodiča, respektíve magnetické pole vniká čoraz hlbšie do objemu supravodiča. Táto tendencia pokračuje až do takej teploty, kedy magnetické pole preniká celým objemom supravodiča. Tento jav možno na grafe vidieť ako maximum (maximálne straty) pri danom vonkajšom magnetickom poli. Pri ďalšom zvyšovaní teploty má toto za následok ďalšie postupné znižovanie kritickej prúdovej hustoty J_c a teda aj tieniacich prúdov tečúcich v celom objeme supravodiča preto hysterézne straty klesajú až do stavu, kedy úplne zaniknú s prechodom supravodiča do normálneho stavu. Merané závislosti v súlade s teoretickými predpokladmi predstavujú straty hysteréznej povahy. Tento fakt potvrdzuje aj ich frekvenčná nezávislosť. Obrázok 5b zobrazuje merané závislosti strát pri konštantnej teplote 28, 29 a 30 K od vonkajšieho poľa porovnané s teoretickými závislosťami počítanými podľa eliptického modelu [5]. Hodnota vonkajšieho poľa, pri ktorej dochádza k zmene smernice predstavuje pole plného prieniku $B_{\rm p}$, ktoré je v súlade s predpokladmi nižšie pre nižšie J_c (vyššiu teplotu). Pre čisto hysterézne straty je očakávaná smernica závislosti pod B_p približne 3 a nad B_p 1 [6].



Obr. 5: a) Závislosť magnetizačných strát vorky 1F-1 od teploty pri konštantnom magnetickom poli s viacerými amplitúdami a frekvenciami 72 Hz a 144 Hz b) merané závislosti strát pri konštantnej teplote 28, 29 a 30 K od vonkajšieho poľa porovnané s teoretickými závislosť ami počítanými podľa eliptického modelu.

Merané teplotné závislosti magnetizačných strát pre vzorky 1F-1 a 1F-2 s

rovnakou konštrukciou a rôznym J_c sú zobrazené na obrázku 6a. Vplyv rozdielnej prúdovej hustoty na magnetizačné straty je jasne viditeľný. V zhode s očakávaniami sú straty vzorky s nižším J_c pri rovnakom vonkajšom poli nižšie, respektíve k plnému prieniku vzorky rovnakým vonkajším poľom dochádza pri vyššej teplote pre vzorku s vyšším J_c . Vplyv rozmeru supravodivého filamentu je demoštrovaný na porovnaní vzoriek **1F-1** a **1F-3** (obrázok 6b). Vzorka **1F-3** má v porovnaní s **1F-1** takmer dvojnásobný priemer filamentu a súčasne výrazne nižšiu kritickú prúdovú hustotu [7]. Z meraných výsledkov je zrejmé, že rozmer filamentu má rozhodujúci vplyv na hysterézne straty supravodiča a straty vo vzorke **1F-3** sú vyššie napriek nižšej J_c . Z tohto dôvodu sú pre nízke straty supravodičov nutné čím menšie priemery supravodivých filamentov.



Obr. 6: a) Porovnanie závislostí magnetizačných strát vorky 1F-1 a 1F-2 s rôznou prúdovou hustotou b) Porovnanie závislostí magnetizačných strát vorky 1F-1 a 1F- s rôznym priemerov supravodivého filamentu.

Silný vplyv vírivých prúdov bol pozorovaný vo vzorke **1F-4** obsahujúcej matricu z vysoko vodivej medi. Povaha strát vírivými prúdmi bola overená frekvenčnou závislosťou, skúmaním strát v čistých kovoch ako aj následným odleptaním medenej stabilizácie a meraním. Pozorované teplotné závislosti pri rôznych aplitúdach vonkajšieho poľa a ich porovnanie s meraním strát v v medi s 99,999% čistotou sú zobrazené na obrázku 7a. Obrázok 7b ukazuje porovnanie výsledkov vzorky **1F-4** pred a po odleptaní medenej matrice. Výsledky jednoznačne dokazujú nevhodnosť použitia materiálov s vysokou elektrickou vodivosťou v kompozitoch určených pre striedavé aplikácie. Pozícia maxima strát v teplotnej závislosti, ktorá je výrazne vyššia ako pri predošlých meraniach, taktiež potvrdzuje vyššiu kritickú prúdovú hustotu v súlade s očakávaniami

pre IMD technológiu prípravy [8].



Obr. 7: a) Porovnanie závislostí magnetizačných strát vorky 1F-4 so stratami v medi s 99,999% čistotou b) Porovnanie závislostí magnetizačných strát vorky 1F-4 pred a po odleptaní medenej matrice.

Poslednou skúmanou monofilamentárnou vzorkou bola vzorka **1F-5** obsahujúca magnetickú monelovú matricu [9]. Z teplotných závislostí zobrazených na obrázku 8a vyplýva, že straty supravodiča majú minoritný podiel na celkových stratách kompozitu. Z tohto hľadiska sa javí použitie magnetických materiálov opäť ako nevhodné pre striedavé aplikácie.



Obr. 8: a) Závislosť magnetizačných strát vorky 1F-5 od teploty pri konštantnom magnetickom poli s viacerými amplitúdami a frekvenciami 72 Hz a 144 Hz b) Porovnanie závislostí magnetizačných strát všetkých monofilamentárnych vzoriek.

Experimentálne výsledky skúmaných magnetizačných strát v monofilamentárnych MgB_2 drôtoch dokazujú, že nízke straty vyžadujú čím menšie priemery supravodivých vlákien. Vzhľadom na to, že kovové časti kompozitu môžu dodatočnými stratami vo forme vírivých prúdov alebo magnetických hysteréznych strát významne vplývať na celkové straty kompozitu, použitie elektricky dobre vodivých respektíve magnetických materiálov pre stabilizáciu nie je vhodné.

Magnetizačné straty v mnoho vláknitých MgB₂ supravodičoch (efekt kroku twistu)

Ako skôr ukázané, pre znižovanie hysteréznych už bolo strát minimalizovať supravodivých v supravodičoch ie nutné priemer filamentov. Jednou z možností je produkcia supravodivých kompozitov vo forme mnoho vláknitých tzv. multifilamentárnych kompozitov. V takomto prípade však začína hrať rolu ďalší nežiaduci disipatívny mechanizmus; takzvané väzbové straty vznikajúce indukovanými prúdmi do fiktívnych slučiek tvorených supravodivými vláknami uzatvárajúce sa cez kovové časti kompozitu. Na rozdiel od strát hysteréznych, väzbové straty závisia od frekvencie vonkajšieho poľa.



Obr. 9: a) Rez skúmanou 30-filamentárnou 30F b) Porovnanie (hysteréznych) strát v monofilamentárnej vzorke 1F-1 a strát v 30-filamentárnej vzorke 30F.

Na obrázku 9b je porovnanie teplotnej závislosti magnetizačných strát v konštantnom vonkajšom poli 3 mT a frekvenciách 72 Hz a 144 Hz. Kým hysterézne straty vo vzorke **1-F1** dosahujú pri teplotách pod 25 K veľmi nízke hodnoty, u multifilamentárnej vzorky **30F** zostávajú straty v rovnakom teplotnom intervale relatívne vysoké a prakticky od teploty nezávislé. Takýto priebeh indikuje silný vplyv väzbových strát vo vzorke. Zatiaľ čo hysterézne straty dané magnetizáciou vzorky s teplotou klesajú kvôli postupnému vytláčaniu poľa z objemu supravodiča s narastajúcou prúdovou hustotou, väzbové straty závisia iba od amplitúdy a frekvencie vonkajšieho poľa, respektíve efektívneho prierezu fiktívnych slučiek, v

ktorých sú väzbové prúdy indukované. Z tohto dôvodu zostávajú straty vo vzorke **30F** relatívne konštantné v spomínanom teplotnom intervale. Frekvenčná závislosť potvrdzuje predpoklad väzbových strát. Vo všeobecnosti existujú dve možnosti, ako eliminovať nežiaduce väzbové straty v multifilamentárnych kompozitoch. Prvou možnosťou je zníženie efektívneho prierezu fiktívnych slučiek pomocou twistovania vodičov, druhou je zvýšenie elektrického odporu medzi filamentami. Efekt redukcie striedavých magnetizačných strát vplyvom twistovania je jasne viditeľný z meraných závislostí na obrázku 10a. Celkové straty výrazne klesajú so skracujúcim sa krokom twistu a taktiež sa mení ich frekvenčná závislosť, čo je spôsobené zmenou charakteristickej časovej konštanty kompozitu.



Obr. 10: a) Závislosti AC strát od teploty v netwistovanej 30-žilovej vzorke 30F a sérií twistovaných vzoriek rovnakej konštrukcie a rôznym krokom twistu b) závislosti AC strát normované koeficientom degradacie kritického prúdu.

Je však nutné zdôrazniť, že na celkovom redukovaní strát v twistovaných vzorkách sa okrem znižovania efektívnych prierezov slučiek vplyvom twistovania podieľa aj ďalší efekt; a síce degradácia J_c kvôli mechanickému namáhaniu pri procese twistovania. Pre zohľadnenie tohto nežiaduceho javu sme preto merané straty normovali koeficientom degradácie prúdu, ktorý predstavuje podiel kritického prúdu danej twistovanej vzorky a kritického prúdu vzorky netwistovanej. V takomto zohľadnení však výsledky nadobudajú nový rozmer. Normované straty pre twistované drôty s krokom twistu kratším, ako 10 mm sú dokonca vyššie, ako straty netwistovanej vzorky. Z toho vyplýva, že napriek zníženiu striedavých strát vplyvom twistovania došlo k celkovému zhoršeniu jeho transportných vlastností. Je preto zrejmé, že pre danú technológiu prípravy

existuje optimálna dĺžka kroku twistu a twistovanie na dĺžky kratšie celkové vlastnosti supravodiča zhoršuje [10].

Magnetizačné straty v mnoho vláknitých MgB₂ supravodičoch (efekt odporovej bariéry)

Ďalšou možnosťou ako eliminovať väzbové straty je zníženie indukovaných väzbových prúdov pomocou odporovej bariéry okolo supravodivých filamentov. Pre tento účel boli experimentálne študované multifilamentárne netwistované vzorky s Nb, Ti a NbTi bariérami. Rezy vybraných vzoriek sú na obrázku 11.



Obr. 11: Priečne rezy skúmaných netwistovaných MgB₂ multifilamentárnych drôtov s rôznymi bariérami a) 6F-1 s Nb bariérou , b) 6F-2 s Ti bariérou, c) 6F-3 s Nb bariérou a d) 7F-2 s NbTi bariérou

Rozdielny priebeh meraných závislostí (obd 12a) pri nízkych teplotách indikuje vplyv odporovej bariéry na väzbové straty. Pri teplote 18 K sú straty vzorky **6F-2** nižšie v porovnaní so vzorkou **6F-1** napriek tomu, že v pozícií maxima (kde dominujú hysterézne straty samostatných filamentov) dosahujú približne rovnaké hodnoty. Tento fakt sa môže javiť ako rozpor s teoretickými očakávaniami, keďže odpor Ti bariéry vo vzorke **6F-2** má nižší odpor ako Nb bariéra v **6F-1**.



Obr. 12: a) Závislosti AC strát od teploty v 6-žilových vzorkách s rôznymi bariérami 6F-2 a 6F-30F a sérií twistovaných vzoriek rovnakej konštrukcie a rôznym krokom twistu b) Teoretické frekvenčné priebehy pre dĺžku twistu 50 mm a vybrané odpory matrice.

Keďže väzbové straty závisia od frekvencie podľa vzťahu $Q_c = (B_a^2/2\mu_0) \left[(2\pi n_s \omega \tau) / (1 + \omega^2 \tau^2) \right]$ kde n_s je faktor tvaru a τ je charakteristická časová konštanta, je zrejme v závislosti od frekvencie dosiahnu väzbové straty maximum keď $\omega^2 \tau^2 = 1$ [11]. Z frekvenčnej závislosti je preto možné určiť charakteristickú časovú konštantu, ktorá pre kompozit s kruhovou filamentárnou zónou spĺňa Campbellovú rovnicu $\tau = (\mu_0/2\rho_{eff})(L_p/2\pi)^2$ kde L_p je krok twistu a ρ_{eff} je efektívny odpor matrice. Z frekvenčnej závislosti je preto možné pre vybrané geometrie multifilamentov určiť efektívny odpor matrice. Teoretické frekvenčné priebehy počítané pomocou Campbellového vzťahu pre dĺžku twistu 50 mm a vybrané odpory matrice sú zobrazené na obrázku 12b. Merané závislosti striedavých magnetizačných od frekvencie strát pre 6-filamentárne vzorky s Nb bariérou 6F-1, 6F-3 a Ti bariérou 6F-2 sú zobrazené na obrázku 13a. Frekvenčné závislosti vo vzorke 7F-2 s NbTi bariérou merané pri viacerých teplotách ukazuje obrázok 13b. Z pozície maxima boli určené časové konštanty pre určenie efektívnych odporov bariér použitých v teoretických výpočtoch na obrázkoch 13a,b.



Obr. 13: a) Merané a vypočítané závislosti striedavých magnetizačných strát od frekvencie pre 6-filamentárne vzorky s Nb bariérou 6F-1, 6F-3 a Ti bariérou 6F-2 b) frekvenčné závislosti vo vzorke 7F-2 s NbTi bariérou merané pri viacerých teplotách.

Namerané závislosti vysvetľujú taktiež výsledok merania teplotných závislosti pri frekvencií poľa 72 Hz (obr. 12a). Keďže 72 Hz je v oboch prípadoch nad maximom strát v závislosti od frekvencie a súčasne nižší odpor Ti bariéry má za následok kratšiu časovú konštantu, straty vo vzorke **6F-2** sú pri 72 Hz nižšie ako v **6F-1** s Nb bariérou.

Magnetizačné straty v MgB₂ kábloch

Supravodivé káble sú perspektívnou štruktúrou v supravodivých aplikáciách obzvlášť v prípadoch vyžadujúcich vysoké prúdové zaťaženia. Rezy MgB_2 káblov s rovnakou konfiguráciou 6 vodičov okolo jedného centrálneho s dĺžkou translácie 15 mm tvorené 30-finalemtárnymi netwistovanými drôtmi **7x30F** respektíve monofilamentami **7x1F** sú zobrazené na obrázku 14a,b.





Obr. 14: Rezy skúmaných MgB2 káblov a) 7x30F and b) 7x1F.

Namerané výsledky striedavých magnetizačných strát v MgB₂ kábloch a ich porovnanie so stratami 30-filamentarnej netwistovanej vzorky **30F** respektíve twistovanej vzorky **30F-10mm** sú zobrazené na obrázku 15a. Ako je z experimentálnych výsledkov zrejmé, káblovanie nemá vplyv na zníženie väzbových strát v jednotlivých vodičoch. Vzatím do úvahy taktiež transportné vlastnosti, normované straty (obr. 15b) kábla **7x30F** sú podstatne vyššie než straty netwistovaného multifilamentu. Rozdielne výsledky je možné vidieť pre vzorku **7x1F**. Straty monofilamentárneho kábla dosahujú nižšie hodnoty ako twistovanej vzorky **30F-10mm** a súčasne sú hysteréznej povahy. Takáto konštrukcia sa preto javí ako mimoriadne perspektívna pre striedavé aplikácie.



Obr. 15: a) Závislosti AC strát od teploty v MgB2 kábloch porovnaná so stratami v netwistovanej 30-žilovej vzorke 30F a twistovanej vzorke 30F-10mm b) závislosti AC strát normované koeficientom degradacie kritického prúdu.

Magnetizačné straty v MgB₂ druhej generácie (IMD)

Supravodiče MgB₂ takzvanej druhej generácie vyrobené pomocou IMD technológie (inter metal diffusion) majú v porovnaní so širšie rozšírenou PIT technológiou (PIT) viacero nesporných výhod, ako sú vyššie J_c , vyššie T_c ale taktiež lepšiu odolnosť pri mechanickom namáhaní [7, 12]. Z tohto dôvodu je preto taktiež možné ich twistovanie na kratšie dĺžky twistu bez nežiaducej degradácie transportných vlastností. Priečny rez skúmanou 4-filamentárnou vzorkou **4IMD** je na obrázku 16a. Porovnanie normovaných kritických prúdov verzus dĺžka kroku twistu pre 30-filamentárnu PIT a 4-filamentárnu IMD sériu vzoriek je na obrázku 16b.



Uor. 10: а) жел кышапеј 1MD vzorky b) porovnanie normovaných kritických prúdov verzus dĺžka kroku twistu pre 30-filamentárnu PIT a 4-filamentárnu IMD sériu vzoriek.

Ako je možné vidieť z porovnania obrázkov 17a a 17b, normovanie strát koeficientom degradácie kritického prúdu má minimálny vplyv na výsledné teplotné závislosti. Z tohto hladiska je možné tvrdiť, že twistovanie meraných IMD vzoriek MgB₂ pomáha redukovať hysterézne straty bez výraznejšieho zhoršenia ich transportných vlastností, na základe čoho je možné twistované multifilamentárne MgB₂ vodiče považovať za perspektívny nízkostratový supravodič. Obrázok 18 ukazuje namerané frekvenčné závislosti v netwistovanej vzorke 4IMD a vzorkách s krokom twistu 17, 10 a 5 mm porovnané s vypočítanými závislosťami pomocou Campbelového vzťahu. Výsledky demonštrujú, ako ovplyvňuje dĺžka twistu charakteristickú časovú konštantu.



Obr. 17: a) Závislosť striedavých magnetizačných strát od teploty normovaných koeficientom degradácie kritického prúdu b)



Obr. 18: Frekvenčné závislosti AC strát 4-filamentárnych IMD vzoriek.

ZHRNUTIE

Predložená práca je zameraná na štúdium striedavých strát v MgB₂ supravodičoch. Prvým z cieľov tejto práce bol vývoj meracieho systému umožňujúceho experimentálne štúdium magnetizačných strát pri teplotách v okolí 20 K a vonkajších poliach s rôznou amplitúdou a frekvenciou. Keďže v blízkosti meranej vzorky nie je možné použitie akýchkoľvek magnetických a/alebo elektricky vodivých materiálov, pre tento účel bol navrhnutý špeciálny nekovový sklotextitový kryostat. Pre chladenie meraných vzoriek sme vyrobili držiak vzoriek zo špeciálneho mechanicky obrábateľného keramického materiálu s vysokou tepelnou vodivosťou. Pre zamedzenie zahrievania držiaku od tepelného žiarenia z okolia bol použitý tepelný štít chladený prvým stupňom cryo-coolera a niekoľko vrstiev tzv. superizolácie. Presná stabilizácia teploty vzorky je zabezpečená vyhrievacím vinutím softvérovo riadeným zdrojom umožňujúcim nastavenie konštantnej teploty s presnosťou až 10^{-2} K v rozsahu od 15.5 K až po izbovú teplotu.

Pre účel merania magnetizačných strát sme navrhli merací systém založený na originálnej "callibration free" metóde. Navrhnuté a vyrobené boli dva magnety (merací a kompenzačný) schopné vysokého prúdového zaťaženia bez nežiaduceho zahrievania a mechanických vibrácií. Pre tento účel sme vyrobili masívne sklotextitové kostry magnetov so systémom prietokových kanálikov pre chladenie pomocou tekutého dusíka. Pre zvýšenie citlivosti a presnosti meraní boli navrhnuté tri kompenzačné vinutia umožňujúce samostatnú kompenzáciu jednotlivých zložiek meraného signálu. Merací systém umožňuje precízne meranie striedavých magnetizačných strát vo vonkajších poliach v rozsahu 10⁻⁴ T až 10⁻¹ T pri frekvenciách 72 Hz a 144 Hz. Pre nižšie amplitúdy (do 18 mT) je možné meranie AC strát v širokom frekvenčnom rozsahu 2.3 Hz až 1152 Hz.

Vzhľadom na tri samostatné procesy podieľajúce sa na celkových AC stratách v supravodičoch, experimentálne štúdium bolo zamerané na niekoľko sérií supravodivých MgB₂ kompozitov. Hysterézne straty boli študované na sérií mono-filamentárnych drôtov. Experimentálne výsledky ukázali, že v súlade s teoretickými predpokladmi magnetizačné straty monofilamentu závisia priamo od kritickej prúdovej hustoty ako aj

priemeru supravodivého jadra. Keďže vysoké prúdové hustoty sú hlavnou výhodou supravodičov, jedinou možnosťou ako znižovať hysterézne straty je minimalizáciou priemeru supravodivých filamentov (napr. formou multifilamentov). Výrazný vplyv vírivých prúdov bol pozorovaný u vzorky s dobre vodivou medenou stabilizáciou. Vírivé prúdy boli potvrdené frekvenčnou závislosťou a meraním danej vzorky s chemicky odleptanou medenou matricou. Pre detailnejšie sledovanie správania vírivých prúdov v kovoch použitých pre stabilizáciu boli merané striedavé straty v čistej medi a GlidCope. Na základe experimentálnych výsledkov sa GlidCop sa javí ako najperspektívnejší materiál pre stabilizáciu MgB2 drôtov určených pre AC aplikácie. Vo vzorke obsahujúcej magnetický Monel bol pozorovaný silný vplyv magnetickej hysterézy v matrici a samotný supravodič mal prakticky minimálny podiel na celkových stratách kompozitu v skúmanom rozsahu polí, frekvencie a teploty. Preto použitie magnetických materiálov pre stabilizáciu MgB₂ drôtov určených pre striedavé aplikácie nie je vhodné.

Vplyv väzbových strát a ich eliminácia pomocou twistovania boli študované na serií 30-filamentárnych MgB_2 drôtov vyrobených pomocou in-situ PIT technológie. Výrazný vplyv väzbových prúdov bol pozorovaný v netwistovanej vzorke. Vplyv twistovania bol jasne viditeľný a striedavé straty klesali so skracujúcim sa krokom twistu. Zohľadnením degradácie transportných vlastností vplyvom mechanického namáhania pri procese twistovania bola nájdená optimálna dĺžka kroku twistu pre danú technológiu.

Efekt zníženia väzbových strát pomocou odporovej bariéry okolo filamentov bol experimentálne skúmaný v sérii netwistovaných 6 a 7 filamentových MgB_2 drôtoch s Nb, Ti a NbTi bariérami. Vplyv efektívneho odporu bariéry bol jasne viditeľný pre skúmané materiály hlavne z frekvenčných závislostí magnetizačných strát. Ako najefektívnejší materiál pre elimináciu väzbových prúdov v MgB_2 kompozitoch pre pracovné teploty v okolí 20 K sa javí dobre mechanicky tvárny NbTi, podstatne vyšším odporom, ako Nb a Ti.

Striedavé magnetizačné straty boli taktiež skúmané v MgB₂ kábloch rôznej konštrukcie. Boli porovnané dva 7-žilové káble obsahujúce 6 vodičov okolo jedného centrálneho. Zistili sme, že v takejto konfigurácií majú rozhodujúci vplyv straty jednotlivých vodičov. U kábla obsahujúceho netwistované 30-filamentárne vodiče bol pozorovaný silný vplyv väzbových strát. Na druhej strane, v kábli pozostávajúcom z monofilamentárnych drôtov boli pozorované straty hysteréznej povahy, ktoré boli vďaka malému priemeru supravodivých jadier dokonca nižšie, než straty twistovanej 30-filamentárnej vzorky. Takúto konštrukciu supravodivého kábla možno preto považovať za veľmi perspektívnu pre striedavé aplikácie vyžadujúce nízke straty.

Napokon boli študované magnetizačné straty MgB2 supravodičov tzv. druhej generácie vyrobené pomocou IMD technológie (Inter-Metal-Diffusion). Merané boli straty v sérií 4-filamentárnych drôtov obsahujúcej netwistovaný a twistované vzorky s rôznym krokom twistu. Efekt redukcie väzbových strát vplyvom twistovania jasne viditeľný a AC straty sa znižovali so skracujúcim sa krokom twistu. Na rozdiel série vzoriek vyrobených pomocou PIT technológie, u IMD vzoriek nebola pozorovaná významná degradácia transportných vlastností vplyvom mechanického procese twistovania. Eliminácia väzbových namáhania pri strát twistovaním a súčasne mechanická odolnosť umožňujúca twistovanie na krátke kroky twistu bez nežiaducej degradácie transportných vlastností MgB₂ supravodiče druhej generácie (IMD) perspektívnymi pre robia použitie v striedavých aplikáciách.

CONCLUSIONS

Presented work is focused on AC losses in MgB₂ superconductors. Our first aim was to develop a suitable measurement system allowing experimental studies of magnetization AC losses at temperatures around 20 K and applied external field with different amplitude and frequency. Due to impossibility of using any magnetic and/or electrically conductive materials near the sample, special non magnetic and non metallic vacuum vessel made of fiberglass tektite was designed. Special holder made of ceramic material with high thermal conductivity was developed for cooling of measured samples connected with the second stage of cryocooler by flexible copper strand. To prevent heating of sample holder by thermal radiation, system of thermal copper shielding cooled by the first stage of cryocooler and several layers made of super insulation was applied. Required temperature stabilization was done by heating coil with remote controlled power supply allowing setting constant temperature in temperature from 15.5 K up to practically room temperature. Temperature stabilization is possible with an accuracy of up to 10^{-2} K.

For the purpose of magnetization AC loss measurement an apparatus based of original calibration free method was built. Two magnets (measurement and compensation) were designed to be applicable for high current load without unwanted heating and any mechanical vibrations. Massive fiberglass-textit magnet skeleton with system of flow channels for cooling with liquid nitrogen was used. To increase the accuracy and sensitivity of AC measurements, system of pick up and compensation coils was successfully developed. Developed apparatus is able to measure magnetization AC losses with high precision and sensitivity in external field ranged from 10^{-4} T up to 10^{-1} T at frequencies 72 Hz and 144 Hz. At lower field amplitudes (up to 18 mT) AC loss measurement can be perform in wide frequency range from 2.3 Hz up to 1152 Hz.

Considering of are three separate contributions into the total AC losses in a superconductor, several series of superconducting MgB_2 composites was studied experimentally. Set of mono-core wires was studied to examine behavior of hysteresis loss and measurements confirm the theoretical assumptions that hysteretic loss in MgB_2 depends directly on

the critical current density as well as on the diameter of superconducting filaments. However high transport currents of superconductors are required, the only one possibility how to decrease hysteresis loss is to minimize the size of filaments (by production of multifilamentary composites or cables). Mono-core sample containing material with high electrical conductivity showed strong eddy current losses in metallic material. The eddy currents were confirmed by the measurements of AC loss at different frequencies and proved by measurement of the same piece of wire with chemically removed copper sheath. To exact study of eddy current losses in used metallic materials (pure Copper and GlidCop wires) were measured under the same conditions as mono-core samples. GlidCop material appears to be the most perspective for stabilization of MgB₂ wires designed for AC applications. In the sample containing magnetic Monel sheath a strong magnetic hysteresis loss was observed and superconducting core practically does not influence the total losses in examined field, frequency and temperatures. Therefore, using of any magnetic material for MgB₂ wires is not suitable for aimed AC application.

Decoupling in twisted samples was studied for series of 30-filament wires made by in-situ PIT technology. Strong impact of coupling current losses was shown on non-twisted wire and lowered one was clearly visible in twisted samples. The total AC losses decreased rapidly with shortening of twist pitch. Taking into account the transport properties, critical current due to twisting has been used for normalized AC losses comparisons. Normalized AC losses allow finding optimal length of twist pitch for individual MgB_2 wires.

The effect of increased resistance among the filaments was experimentally studied in two series of 6- and 7-filament wires with Nb, Ti and NbTi barriers. The impact of barrier resistivity has been shown for mentioned materials, especially from measurements of wide range frequency dependence. As a most suitable barrier material for MgB_2 wires intended for working temperature about 20 K and low AC losses appears well formable NbTi with much higher resistivity in comparison to Nb or Ti.

Magnetization AC losses in different types of MgB_2 cables were experimentally studied. Two kinds of cables containing 7 wires (6 wires around 1 central wire) were compared. It was found, that the magnetization AC losses of individual wires of cable have dominant effect. Strong impact of coupling current losses in cable made of non-twisted 30-filamentary wires was clearly visible. Different behavior has been observed in cable made from mono-core wires where hysteretic loss was dominant. Instead of that, AC losses in cable from single-core wires show the lowest AC losses even in comparison with twisted 30-filament wire and cable consist of such wires. Consequently, cable made of thin single-core wires appears suitable for applications required low AC losses.

Finally, MgB₂ wires of so called 2-nd generation made by Inter-Metal-Diffusion (IMD) technology were studied. A series of 4-filament wires containing non-twisted sample and four twisted samples with various twist pitch were measured. The decoupling effect due to twisting was clearly demonstrated and AC losses decreased rapidly with shortening of twist pitch. Unlike the twisted wires made by in-situ PIT technology, the significant degradation of critical current density due to torsion stress by twisting process was not observed. Elimination of coupling losses by twisting and lower sensitivity of MgB₂ wires made by IMD to torsion stress allows manufacturing superconducting MgB₂ composites which are very perspective for future AC applications.

Referencie

- J. Šouc, F. Gömöry and M. Vojenčiak, *Calibration free method for* measurement of the AC magnetization loss, Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 592-595
- Kováč. J, Šouc. J, Kováč, P. Experimental study of the AC magnetizatiom loss in MgB2 superconducting wires at diferent temperatures, Physica C 475 (2012) 1-4
- [3] Oomen P.M., *AC loss in superconducting tapes and cables*, Gegevens Koninklijke Bibliotheke, Den Haag, (2000)
- [4] P. Kováč, T. Melišek, L. Kopera, J. Kováč, I. Hušek, Selected properties of GlidCop sheathed MgB2 wires Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 095008. 8pp.
- [5] Gömöry, F., Tebano, R., Sanchez, A., Pardo, E., Navau, C., Husek, I., Strycek, F. and Kovac, P: *Current profiles and ac losses of a* superconducting strip with an elliptic cross-section in a perpendicular magnetic field, Sup Sci and Technology **15** (2002) 1311
- [6] C.P. Bean, *Magnetization of Hard superconductors*, Review of Modern Physics 36 (1964), 31.
- [7] Jonna Viljamaa, PhD Thesis, Bratislava 2012
- [8] I. Hušek, P. Kováč, A. Rosová, Pachla W, T. Melišek and Hain M., MgB₂ wire made by IMD technique, Journal of All and Compounds 588 (2014) 366
- [9] http://www.hypertechresearch.com/mgb2%20wire.htm
- [10] Kováč, J., Šouc, J., Kováč, P., Hušek, I., Gömöry, F., Experimental study of magnetization AC loss in MgB2 wires and cables with non-magnetic sheath. Physica C 495 (2013) 182-186
- [11] A.M. Campbell: *A general treatment of losses in multifilamentary superconductors*, Cryogenics **22**, p. 3 (1982).
- [12] Giunchi G 2003 Int. J. Modern Physics B 17 453