

**Vedecká rada Fakulty matematiky, fyziky
a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave**

Mgr. Eugen Seiler

Autoreferát dizertačnej práce

**Vplyv geometrického usporiadania na magnetické
vlastnosti multifilamentárnych vodičov
z vysokoteplotných supravodičov**

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor
V odbore 11-22-9 Fyzika kondenzovaných látok a akustika

Bratislava

Jún 2005

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

Predkladateľ: Mgr. Eugen Seiler
Elektrotechnický ústav SAV
Dúbravská cesta 9
841 04 Bratislava

Školiteľ: Ing. Fedor Gömöry, DrSc.
Oddelenie fyziky supravodičov
Elektrotechnický ústav SAV v Bratislave

Oponenti: Prof. Ing. Rudolf Durný, DrSc.
FEI STU, Bratislava

Doc. RNDr. Richard Hlubina, PhD.
FMFI UK, Bratislava

RNDr. Peter Skyba, CSc.
ÚEF SAV, Košice

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa: o hod.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia 11-22-9 Fyzika kondenzovaných látok a akustika, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa:,
na Elektrotechnickom ústave SAV, Dúbravská cesta 9, Bratislava.

Predseda spoločnej odborovej komisie:
prof. RNDr. Viktor Bezák, DrSc.
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

1 Úvod

Supravodivými materiálmi vhodnými na prenos veľkých elektrických prúdov sú tvrdé supravodiče druhého typu. Pre elektromagnetické vlastnosti týchto materiálov je rozhodujúci záchyt magnetického toku v objeme supravodiča, nazývaný tiež pinning, vďaka ktorému môže supravodivý prúd tiecť vo veľkej časti, a prípadne aj v celom objeme supravodiča.

Historicky prvými aplikáciami, využívajúcimi tzv. nízkoteplotné supravodiče, sú zariadenia kde klasické kovové vodiče nepostačujú, a investičné a prevádzkové náklady nie sú rozhodujúce. Typickým príkladom sú elektromagnety na vysoké magnetické polia, a najčastejšie používanými materiálmi sú intermetalickej zliatiny Nb₃Sn, Nb₃Ge, či zliatina Nb-Ti. Hlavnou príčinou obmedzeného uplatnenia v praxi je potreba chladiť tieto materiály na teplotu varu kvapalného hélia (4,2 K), čo vyžaduje zložitý a nákladný chladiaci systém a veľmi drahé chladiace médium.

Objav vysokoteplotných supravodičov v roku 1986 priniesol okrem iného aj intenzívny záujem o nahradenie klasických vodičov v bežných silnoprúdových zariadeniach, ako sú napr. káble na prenos elektrickej energie či transformátory, vodičmi supravodivými, využívajúcimi tieto materiály. Vysoká kritická teplota totiž umožňuje ich použitie pri teplote kvapalného dusíka (77 K), pri ktorej je na odvedenie 1 W tepelného príkonu potrebný výkon chladiaceho zariadenia 10 až 20 W, čo je výrazný posun oproti hodnote 500 až 1000 W pri 4,2 K. Vytvárajú sa tak predpoklady pre omnoho vyššiu energetickú efektivitu celého zariadenia.

Z vysokoteplotných supravodičov sú z hľadiska silnoprúdových aplikácií najviac skúmanými materiál YBa₂Cu₃O_x (YBCO) a materiál Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x (BSCCO, alebo Bi-2223). V súčasnosti sa veľká pozornosť venuje vývoju vodičov využívajúcich materiál YBCO (tzv. YBCO coated vodiče), avšak najprepracovanejším typom technického vodiča na báze vysokoteplotných supravodičov zatiaľ zostávajú Bi-2223 pásy, komerčne dostupné v dĺžkach niekoľko kilometrov. Jedná sa o kompozitné vodiče, tvorené supravodivými vláknami – filamentami – z materiálu Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x uzavretými v striebornej matici. V praxi použiteľné Bi-2223 pásy obsahujú vždy viacero supravodivých filamentov a zvyknú sa preto nazývať multifilamentárnymi. Typické pásy obyčajne obsahujú 30 až 100 filamentov.

Výroba pásov je pomerne zložitý proces, nakoľko tepelným spracovaním je potrebné dosiahnuť vytvorenie supravodivej fázy 2223 a pomocou mechanického spracovania treba zároveň zabezpečiť dostatočný stupeň textúry kryštalickej fázy Bi-2223, ktorá je nevyhnutná pre dosiahnutie vysokých kritických prúdových hustôt. Drahé východiskové materiály a zložitý proces výroby vedú k pomerne vysokej cene Bi-2223 pásov, ktorá je v súčasnosti asi desaťnásobne vyššia ako cena medených vodičov.

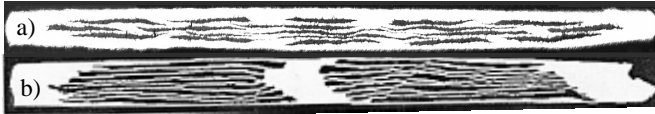
Najväčšími problémami pri použití BSCCO pásov v silnoprúdových zariadeniach sú existencia striedavých strát a prudký pokles kritickej prúdovej hustoty pri vystavení pásky magnetickému poľu, najmä pokiaľ je orientované kolmo na širšiu stranu pásky. Ku striedavým stratám dochádza keď supravodičom II. typu s pinningom (tvrdým supravodičom) tečie striedavý prúd a/alebo naň pôsobí striedavé magnetické pole. Predstavujú energetické straty, ktoré sú hradené zdrojmi transportného prúdu a magnetického poľa. Striedavé straty sa vyskytujú vo všetkých tvrdých supravodičoch, avšak vďaka špecifickým vlastnostiam vysokoteplotných supravodičov sú striedavé straty v týchto materiáloch spravidla omnoho väčšie ako v nízkoteplotných supravodičoch. Keďže drvivá väčšina silnoprúdových zariadení pracuje v režimoch striedavého prúdu, je pre konkurencieschopnosť BSCCO pásov, a supravodivých vodičov vôbec, nevyhnutné minimalizovať striedavé straty.

2 Ciele práce a súčasný stav problematiky

Popis správania sa multiflamentárnej pásky v magnetickom poli je základným východiskom pre výpočet striedavých strát celého supravodivého zariadenia. Na správanie sa multiflamentárnej pásky v magnetickom poli má okrem vlastností samotného supravodivého materiálu veľký vplyv aj geometrické usporiadanie filamentov v páske, a jeho vhodná voľba pre danú aplikáciu tak môže byť jednou z ciest vedúcich k zníženiu striedavých strát.

Cieľom predkladanej práce bolo experimentálne študovať a navzájom porovnať správanie sa dvoch základných typov geometrického usporiadania filamentov v supravodivej páske. Jednalo sa o usporiadanie, pri ktorom sa jednotlivé filamenty navzájom čiastočne prekrý-

vali, vzdialene pripomínajúce štruktúru tehlovej steny (páska 520, obr. 1a), a usporiadanie v ktorom boli filameny zoradené do stĺpcov (páska P63B, obr. 1b). Tieto dva typy filamentárnej štruktúry boli realizované v modelových Bi-2223 páskach 520 (19 filamentov) a P63B (2 stĺpce po 8 filamentov) pripravených na Elektrotechnickom ústave SAV. Na obrázku 1 sú uvedené fotografie priečnych rezov týmito páskami, dĺžka pásov je kolmá na rovinu papiera.



Obr. 1: Fotografie prierezu pásky 520 (a) a P63B (b). Biela oblasť je strieborná matrica pásky a v nej vnorené čierne oblasti sú Bi-2223 filameny.

Skúmanie bolo obmedzené na situáciu, kedy je kolmo na širšiu stranu pásky aplikované homogénne magnetické pole, nakoľko magnetické pole tejto orientácie v najväčšej miere potláča supravodivé vlastnosti pásov, a pochopenie správania sa pásy v tejto špeciálnej situácii je rozhodujúce pre popis správania sa vo všeobecnom prípade.

Na približný popis správania sa supravodivých pásov v kolmom aplikovanom poli je možné použiť niektorý z analytických modelov, ktoré však existujú len pre niekoľko veľmi jednoduchých a idealizovaných geometrických tvarov supravodiča. Všetky tieto modely vychádzajú z Beanovho modelu kritického stavu [1]. Jedná sa najmä o model pre tenký pravouhlý strip (pásik) [2] a model pre eliptický strip [3], v niektorých prípadoch možno využiť i model pre tenký kruhový disk [4]. Modely pre nekonečný stĺpec a riadok tenkých pravouhlých stripov [5] sa neukazujú ako vhodné pre popis multifilamentárnych pásov.

Použitelnosť týchto jednoduchých analytických modelov pre popis dvoch skúmaných typov filamentárnych štruktúr bola tiež predmetom záujmu.

Omnoho presnejší popis možno získať s využitím numerických simulácií, ktoré umožňujú pracovať s omnoho reálnejším tvarom supravodiča ako je tomu pri analytických modeloch. Podľa spôsobu, akým sú v rámci numerickej výpočtovej metódy zahrnuté vlastnosti supravodiča, možno metódy rozdeliť na dve skupiny. Metódy z prvej

skupiny modelujú supravodič pomocou nelineárnej, avšak spojitaj voltampérovej charakteristiky, najčastejšie tvaru mocninnej funkcie $E \approx j^n$. Základným a najvýznamnejším predstaviteľom je Brandtova metóda [6]. Druhú skupinu tvoria metódy založené na Beanovom modeli kritického stavu a za hlavného predstaviteľa tu možno označiť metódu minimálnej variácie magnetickej energie (MMVME) [7].

3 Použité experimentálne metódy a závery skúmania

Hlavnou experimentálnou metódou, použitou na skúmanie správania sa pások s dvomi rôznymi usporiadaniami filamentov v kolmom aplikovanom poli, boli merania reálnej a imaginárnej zložky 1. harmonickej komplexnej striedavej susceptibility. Merané boli závislosti zložiek susceptibility od amplitúdy homogénneho magnetického poľa, harmonického priebehu, aplikovaného kolmo na širšiu stranu pások. Rovnobežne s týmto striedavým poľom bolo pri každom meraní na pásku aplikované aj homogénne jednosmerné (konštantné) magnetické pole. Bola tak efektívne potlačená závislosť kritickej prúdovej hustoty od veľkosti magnetického poľa, čo je veľmi dôležité pre možnosť porovnania nameraných priebehov s predpoveďami modelov vychádzajúcich s Beanovho modelu kritického stavu predpokladajúcim konštantnú hodnotu j_c . Merania boli uskutočnené pri konštantnej teplote 31 K a 49 K, výrazne nižšej ako teplota varu kvapalného dusíka, vďaka čomu bola úroveň signálu zo vzorky dostatočná aj pri pomerne veľkých hodnotách jednosmerného aplikovaného poľa (0,1 – 1 T). Použitá bola indukčná meracia metóda s kompenzáciou a využitím lock-in voltmetra.

Merania závislostí zložiek striedavej susceptibility boli doplnené mapovaniami rozloženia kolmej zložky magnetického poľa nad povrchom pásky s prekrývajúcimi sa filamentami. Pri týchto experimentoch bola použitá páska 528 s rovnakým typom usporiadania filamentov, a s celkovo veľmi podobnou štruktúrou ako u pásky 520. Pomocou Hallovej sondy bolo postupne snímané rozloženie magnetického poľa 40 μm nad povrchom pásky, umiestnenej v konštantnom homogénnom magnetickom poli kolmom na jej povrch.

Na základe analýzy experimentálnych výsledkov bol zistený rôzny charakter prenikania magnetického toku do skúmaných dvoch typov

filamentárnych štruktúr. Pri stĺpcovitom usporiadaní preniká magnetický tok do stĺpca filamentov spôsobom, akoby tento tvoril jeden súvislý supravodivý celok, t. j. do filamentov nachádzajúcich sa v prostrednej časti stĺpca preniká tok pomalšie ako do filamentov na okrajoch stĺpca. Je to spôsobené silnou magnetickou interakciou medzi filamentami. V prípade konfigurácie s čiastočne sa prekrývajúcimi filamentami je v dostatočne malých aplikovaných poliach celá filamentárna zóna odtienená od magnetického poľa a prenikanie magnetického toku do nej možno opäť modelovať ako prenikanie do súvislého supravodiča. S rastom aplikovaného magnetického poľa však veľmi rýchlo začína prevládať prienik magnetického toku do individuálnych filamentov, ktorý ďalej vo všetkých filamentoch postupuje zhruba rovnako rýchlo. Celkovo je tak pre správanie sa štruktúry s čiastočne sa prekrývajúcimi filamentami, na rozdiel od stĺpcovitej štruktúry, rozhodujúce prenikanie magnetického toku do jednotlivých filamentov.

Rozdielny charakter prenikania magnetického toku do supravodivej pásky s čiastočne sa prekrývajúcimi a so stĺpcovito usporiadanými filamentami potvrdzuje aj skutočnosť, že namerané priebehy striedavej susceptibility sa v prvom prípade veľmi dobre zhodujú s krivkou vypočítanou podľa teoretického modelu pre tenký pravouhlý strip, a v druhom prípade s krivkou vypočítanou podľa modelu pre eliptický strip.

S cieľom preskúmať prenikanie magnetického toku pri prechode od stĺpcovito usporiadaných k prekrývajúcim sa filamentom bola vykonaná séria numerických výpočtov. Za týmto účelom bola vyvinutá pôvodná numerická výpočtová metóda, založená na Beanovom modeli kritického stavu a principiálne vychádzajúca z metódy minimálnej variácie magnetickej energie. Metóda umožňuje simulovať prenikanie magnetického toku do supravodivých štruktúr s veľmi nízkou, prípadne so žiadnou vnútornou symetriou.

Aj keď sa pri výpočtoch pracovalo len s veľmi jednoduchou štruktúrou, simulujúcou dva supravodivé filamenty, možno vo výsledkoch jasne pozorovať postupnú zmenu charakteru prenikania magnetického toku. Rozdiely medzi správaním sa dvojice filamentov pri usporiadaní do stĺpca a pri usporiadaní s čiastočným prekryvom majú rovnaký charakter, ako experimentálne zistené rozdiely v správaní sa dvoch skúmaných supravodivých pásov. Výsledky numerických simulácií tak podporujú závery o rozdielnom správaní sa pásov 520 a P63B

v kolmom magnetickom poli zapríčinenom rozdielnym geometrickým usporiadaním filamentov, vyvedené na základe experimentálnych výsledkov.

4 Hlavné výsledky

Hlavné výsledky predkladanej práce je možné zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- ♣ Experimentálne bolo pozorované odlišné správanie sa multifilamentárnych supravodivých pásov s prekrývajúcimi sa a so stĺpcovito usporiadanými filamentami v kolmom aplikovanom magnetickom poli.
V prípade pásky s prekrývajúcimi sa filamentami bol zistený prechod od tienenia celej filamentárnej zóny v malých aplikovaných poliach k tieneniu sa individuálnych filamentov vo vyšších aplikovaných poliach, zatiaľ čo v prípade pásky so stĺpcovito usporiadanými filamentami sa stĺpec filamentov tieni ako súvislý supravodivý celok vo všetkých aplikovaných poliach.
- ♣ Na základe meraní reálnej a imaginárnej zložky komplexnej striedavej susceptibility bolo zistené, že na popis správania sa pásky s prekrývajúcimi sa filamentami možno použiť teoretický model pre tenký pravouhlý strip, a pre pásku so stĺpcovito usporiadanými filamentami je omnoho vhodnejší teoretický model pre eliptický strip.
- ♣ Bola vyvinutá originálna numerická metóda simulácie prenikania magnetického toku do supravodivých objektov, ktoré sú translačne invariatné (nekonečne dlhé) v smere kolmom na homogénne aplikované magnetické pole. Je založená na modeli kritického stavu a možno ju použiť pre objekty s veľmi nízkou vnútornou symetriou, prípadne aj pre objekty bez akejkoľvek symetrie. Vďaka využitiu komerčného softvérového balíka *Femlab* je možné simulovať aj situácie, kedy je supravodič obklopený materiálom s nelineárnou závislosťou magnetickej permeability od magnetického poľa.
- ♣ Pomocou numerických simulácií bol skúmaný prechod od stĺpcovitého k čiastočne s prekrývajúcemu usporiadaniu pre veľmi

jednoduchú modelovú štruktúru, predstavujúcu dva supravodivé filamenty. Výsledky simulácií jasne ukazujú postupnú zmenu charakteru prenikania magnetického toku pri tomto prechode a rozdiely medzi správaním sa dvojice filamentov pri usporiadaní do stĺpca a usporiadaní s čiastočným prekryvom majú rovnaký charakter, ako experimentálne zistené rozdiely v správaní sa dvoch skúmaných multifilamentárnych pásov.

Literatúra

- [1] Bean C. P., Phys. Rev. Lett. **8**, 250 (1962).
- [2] Brandt E. H. and Indenbom M., Phys. Rev. B **48**, 12893 (1993).
- [3] Gömöry F., Tebano R., Sanchez A., Pardo E., Navau C., Husek I., Strycek F. and Kovac P., Supercond. Sci. Technol. **15**, 1311 (2002).
- [4] Clem J. R., Sanchez A., Phys. Rev. B **50**, 9355 (1994).
- [5] Mawatari Y., Phys. Rev. B **54**, 13215 (1996).
- [6] Brandt E. H., Phys. Rev. B **54**, 4246 (1996).
- [7] Pardo E., Sanchez A. and Navau C., Phys. Rev. B **67**, 104517 (2003).

5 Zoznam prác dizertanta, ktoré majú vzťah ku skúmanej problematike

1. Gömöry F., Strýček F., Seiler E., Hušek I., Kováč P., Takács S., Fabbriatore P., Farinon S., Innocenti S., Critical current densities and magnetic losses in Bi-2223 tapes determined from experiments in perpendicular AC magnetic field, IOP Conf. Ser. **167**, 715 (2000).
2. Farinon S., Fabbriatore P., Gömöry F., Seiler E., Shielding and losses in multifilamentary tapes exposed to perpendicular AC magnetic fields, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 2776 (2001).

3. Seiler E., Gömöry F., Tebano R., Strýček F., Magnetic interaction between two superconducting filaments, *Physica C* **372-376**, 1797 (2002).
4. Strýček F., Gömöry F., Tebano R., Seiler E., Apparent strip-like behavior of superconducting tape due to $j_c(B)$ dependence, *Physica C* **372-376**, 977 (2002).
5. Tebano R., Gömöry F., Seiler E., Strýček F., Numerical investigations of the mutual magnetic coupling in superconducting tapes in z-stack arrangement with external ac magnetic field, *Physica C* **372-376**, 998 (2002).
6. Tebano R., Mele R., Boffa V., Gömöry F., Strýček F. and Seiler E., Numerical investigation on AC properties in high T-c superconducting tapes, *Int. J. Modern Phys. B* **17**, 528 (2003).
7. Seiler E., Gömöry F., Fabricatore P., Greco M., Perkins G. and Caplin A. D., Contactless j_c determination and magnetic coupling in multifilament Bi-2223/Ag tapes, *Supercond. Sci. Technol.* **17**, 549 (2004).
8. Zola D., Gömöry F., Polichetti M., Strýček F., Seiler E., Hušek I., Kováč P. and Pace S., A study of coupling loss on bi-columnar BSCCO/Ag tapes through ac susceptibility measurements, *Supercond. Sci. Technol.* **17**, 501 (2004).
9. Gömöry F., Seiler E., Šouc J., Kováč P., Hušek I., Farinon S., Fabricatore P., Perkins G., Caplin A. D., Pardo E., Sanchez A. and Navau C., The influence of filament arrangement on current distribution and AC loss in Bi-2223/Ag tapes, *Supercond. Sci. Technol.* **17**, S150 (2004).
10. Seiler E., Gömöry F., Modeling of magnetic flux penetration into multifilamentary superconducting wire with the help of magnetic energy minimisation, *Czechoslov. J. Phys.* **54**, Suppl. D493 (2004).
11. Pardo E., Seiler E., Gömöry F., A comparison of numerical methods for superconducting tapes in the critical state with transverse applied field, *Czechoslov. J. Phys.* **54**, Suppl. D513 (2004).

6 Ohlasy na práce dizertanta

Tebano R., Gömöry F., Seiler E. and Strýček F., Numerical investigations of the mutual magnetic coupling in superconducting tapes in z-stack arrangement with external AC magnetic field, *Physica C* **372-376**, 998 (2002).

1. Pardo E., Sanchez A. and Navau C., *Phys. Rev. B* **67**, 104517 (2003).
2. Pardo E., Sanchez A., Navau C., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**, 3566 (2003).
3. Pardo E., Chen D-X., Sanchez A. and Navau C., *Supercond. Sci Technol.* **17**, 537 (2004).

Farinon S., Fabbriatore P., Gömöry F., Seiler E., Shielding and losses in multifilamentary tapes exposed to perpendicular AC magnetic fields, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11**, 2776 (2001).

1. Kováč P., Hušek I., Melišek T., Metz A., van Eck H. J. N. and ten Haken B., *Supercond. Sci. Technol.* **15**, 624 (2002).
2. Pardo E., Sanchez A. and Navau C., *Phys. Rev. B* **67**, 104517 (2003).
3. Chen D-X., Pardo E., Navau C., Sanchez A., Fang J., Zhu Q., Luo X-M. and Han Z-H., *Supercond. Sci. Technol.* **17**, 1477 (2004).
4. Pardo E., Chen D-X., Sanchez A., *J. Applied Phys.* **96**, 5365 (2004).
5. Chen D-X., *Measurement Sci. Technol.* **15**, 1195 (2004).

Summary

The possible replacement of the conventional metallic conductors by superconducting wires in the standard and wide-spread power applications, like the transport cables and transformers, is attracting a permanent attention since the discovery of the high-temperature superconductors (HTS) in 1986. It is because the high critical temperature enables to use these materials at liquid nitrogen temperature (~ 77 K), which makes their application in the standard power devices much more feasible.

At present, the most advanced technical conductors from HTS are the BSCCO tapes, commercially available in kilometer lengths. The tape consists of several filaments from high-temperature superconducting material $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (BSCCO), embedded in a silver matrix.

This work focuses on the experimental study and comparison of the behaviour of two basic kinds of the geometrical arrangement of filaments in a magnetic field. It is the arrangement of filaments in an overlapping pattern (kind of a “brick-wall-like” structure), which has been realized in the tape 520, and an arrangement of filaments into columns, realized in the tape P63B (see figure obr. 1). The homogenous magnetic field was applied perpendicular to the tape’s wide face, since in this orientation it has the biggest impact on the superconducting properties and this case is thus very interesting from the practical point of view.

The tapes were studied by means of measuring the dependence of the real and imaginary part of the 1st harmonic AC susceptibility on the amplitude of the homogenous applied AC magnetic field. Together with the AC field, also a DC magnetic field was applied perpendicular to the wide face of the tape, to suppress the $j_c(B)$ dependence. The measurements were held at constant temperature 31 K or 49 K. In addition to the susceptibility measurements, the Hall probe mappings of the magnetic field above the tape with the overlapping filament structure were performed. In these experiments, the tape was exposed to a homogenous and constant (DC) magnetic field of a very low magnitude.

From the analysis of the experimental data it follows, that the penetration of the magnetic flux into the two investigated filamentary arrangements proceeds in a different manner. In the case of columnar arrangement, the flux penetrates into the column of filaments like if it were a solid superconducting bulk. The penetration of magnetic flux into a region of the overlapping filaments can be also modeled like a penetration into a solid bulk, as long as the applied field is low enough. As the applied magnetic field is increasing, the flux penetration into the individual filaments starts to prevail very quickly. The behaviour of the overlapping filamentary arrangement is thus in general determined by the flux penetration into the individual filaments.

To investigate the geometrical effect closer, a series of numerical calculations had been performed, simulating the transition from a columnar to an overlapping geometrical arrangement for two superconducting filaments. An original numerical method was developed for these calculations. It enables to simulate the flux penetration into a superconducting objects that show only very low or none internal symmetry. Owing to the employment of the commercial FEM software Femlab, the method can also be used for the problems, where the superconductor is placed in the vicinity of a nonlinear magnetic media. The results of the numerical simulations support the conclusions drawn from the analysis of the experimental data.