

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-16-0418****Magnetické plášte z kompozitov supravodič/feromagnetikum**Zodpovedný riešiteľ **doc. Ing. Fedor Gömöry, DrSc.**Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Elektrotechnický ústav SAV

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Neformálnu spoluprácu na problematike magnetických plášťov sme rozvinuli so skupinou z Politecnico di Torino, výsledkom je zaslaný príspevok na konferenciu MRS Spring Meeting 2021 s názvom "Experiment and 3D modelling investigation of DC magnetic shielding by machinable MgB₂ bulks" autorov

M Fracasso^{1,2}, S Ferracin¹, R Gerbaldo^{1,2}, G Ghigo^{1,2}, F Laviano^{1,2}, A Napolitano^{1,2}, D Torsello^{1,2}, M Solovyov³, F Gömöry³, M Truccato^{2,4}, Petre Badica⁵, L Gozzelino^{1,2}

¹ Department of Applied Science and Technology, Politecnico di Torino, 10129 Torino, Italy

² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Torino, 10125 Torino Italy

³ Institute of Electrical Engineering, Slovak Academy of Science, 84104 Bratislava, Slovakia

⁴ Department of Physics, University of Torino, 10125 Torino Italy

⁵ National Institute of Materials Physics, 077125 Magurele, Romania

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

neboli podané žiadne patentové prihlášky

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

[1] Solovyov, M. and Gömöry, F.: A–V formulation for numerical modelling of superconductor magnetization in true 3D geometry, Supercond. Sci Technol. 32 (2019) 115001.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab3a85>

[2] Gömöry, F., Šouc, J., Adámek, M., Ghabeli, A., Solovyov, M., and Vojenčiak, M.: Impact of critical current fluctuations on the performance of a coated conductor tape, Supercond. Sci Technol. 32 (2019) 124001.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab4638>

[3] Dilna, N., Fečkan, M., Solovyov, M., and Wang, J.R.: Symmetric nonlinear functional differential equations at resonance, Electron. J. Qual. Theory Differ. Equ. (2019) Iss. 76, 1-16.

http://www.math.uszeged.hu/ejqtde/periodica.html?periodica=1¶mtipus_ertek=publication¶m_ertek=7639

[4] Dilna, N., Fečkan, M., and Solovyov, M.: D-stability of the initial value problem for symmetric nonlinear functional differential equations, Symmetry 12 (2020) Iss. 1761, p. 1-19

<https://www.mdpi.com/2073-8994/12/11/1761>

[5] Kujovič, T. and Gömöry, F.: Impact of local geometrical irregularities on critical currents of REBCO tapes in round cables, *Supercond. Sci Technol.* 33 (2020) 115008

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abb441/pdf>

[6] Gömöry, F. and Šouc, J.: Stability of DC transport in HTS conductor with local critical current reduction, *Supercond. Sci Technol.* 34 (2021) 025005

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/abc73e/pdf>

[7] Solovyov M. Šouc J., Kucharovič M., Gömöry F.: Design of magnetic cloak for an alternating magnetic field with multilayer ReBCO insert, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*,

akceptované na publikovanie v roku 2021

Uplatnenie výsledkov projektu

Demoštrácia vlastností vyvinutých magnetických plášťov bola súčasťou viacerých popularizačných aktivít.

Bol zhotovený plášť, ktorý svojimi rozmermi umožňuje uskutočnenie experimentov z oblasti vplyvu magnetických polí na mikroorganizmy.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Najcennejším výstupom projektu je vyvinutie novej výpočtovej metódy pre modelovanie interakcie magnetického poľa s kompozitnou štruktúrou supravodič/feromagnetikum v reálnej trojrozmernej formulácii problému [1]. Na rozdiel od štandardne používaných dvojrozmerných výpočtov, takýto prístup umožňuje zahrnúť tzv. koncové efekty. To nám otvorilo cestu k návrhu plášťa s dokonalosťou teoretickej predpovede na úrovni 99%. O postupe prác pri vývoji metódy a jej overovaní sme referovali na medzinárodných konferenciách a workshopoch [8-11]. Využitie pri návrhu plášťa, ktorý sme použili v aparátúre na experiment s biologickými preparátmi, dokumentuje publikácia [7].

Je známe, že supravodivé pásy nie sú dokonale homogénne, a kritický prúd sa od miesta k miestu môže meniť až o 10%. Analyzovali sme niekoľko typov rozložení fluktuácií a vypracovali metodiku, ktorá umožňuje zapracovať ich existenciu do výpočtového modelu pre statické podmienky [2]. V ďalšom postupe skúmania sa ukázalo, že najväčším ohrozením snahy o dokonalé tienenie je vznik lokálnych prehriatí v mieste so zníženým kritickým prúdom. Navrhli sme veľmi účinný postup riešenia, založený na analytickom výpočte stability supravodivého stavu v mieste s absolútne najnižšou hodnotou kritického prúdu. Odvodili sme výrazy pre stanovenie podmienok, za ktorých prehriatie buď vôbec nevzniká, alebo sa stabilizuje na úrovni, ktorá neohrozuje existenciu supravodivého stavu [6].

Uvedomujúc si možnosti analytických metód, predovšetkým rýchlosť predpovedí a širší rozsah skúmaných kombinácií parametrov v porovnaní s numerickými výpočtami, časť energie sme venovali spolupráci s kolegami z Matematického ústavu SAV, zameranej na problematiku riešenia nelineárnych funkcionálnych diferenciálnych rovníc [3, 4].

Okrem fluktuácií kritického prúdu, spôsobených výrobným procesom, môže dôjsť k lokálnemu poklesu kritického prúdu aj v dôsledku mechanického poškodenia, spôsobeného navíjaním pásov na cylindrickú formu. Výsledkom našich analýz je model, vytvorený v prostredí komerčného softvéru pre výpočet pomocou metódy konečných prvkov ANSYS. Modelovanie s uvážením realistických podmienok namáhania ukázalo, že najväčším nebezpečením sú lokálne deformácie vyvolané vtláčaním okrajov pásov vnútornej vrstvy do pásov nasledujúcej vrstvy [5].

Vzhľadom na zvýšený rozsah prác, zameraných na hlavný cieľ projektu, ktorým bolo zvyšovanie dokonalosti magnetickkej neviditeľnosti, aktivity na splnenie sekundárnych cieľov - zvyšovanie magnetického poľa a overenie princípu elektromagnetického pohonu - sa uskutočnili iba v obmedzenom rozsahu a nepriniesli výsledky, ktoré by znamenali významný pokrok v oblasti poznania.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

The most important result is the new computational method for modeling of the magnetic field interaction with the composite superconductor/ferromagnetic object, in realistic three-dimensional problem formulation [1]. In difference to the commonly used two-dimensional

computations, it allows to include the end effects. The method paved the way for designing the cloak with 99% correspondence between calculations and experiments. Progress in these efforts was presented on international conferences and workshops [8-11]. Utilization of the new method in designing the cloak that was incorporated into the rig for cloaking experiments with biological objects is reported in [7].

A known property of high-temperature superconducting tapes is the fluctuation of critical current along the length, that could be in the range of 10%. We analyzed several statistical distributions and elaborated the methodology allowing to incorporate the existence of fluctuations into computations for static conditions [2]. It was revealed in further investigations that the mechanism most endangering a perfect cloaking is a local overheating in the place with lowered critical current. For the purpose of dealing with this issue we developed analytical expressions, allowing to predict the conditions at which the local weak spot would not heat or its heating will result in an increased however stable temperature allowing a sustainable existence of superconducting state [6].

Taking into consideration the power of analytical methods, in particular the speed and wider range of explorable parameters compared to numerical computations, a part of our efforts was dedicated to the collaboration with the colleagues from the Institute of Mathematics of the Slovak Academy of Sciences, aimed at resolving the nonlinear functional differential equations [3, 4].

Another mechanism causing a local degradation of superconducting tape is its mechanical damage during wrapping into helical shape on a cylindrical former. A finite element model was developed for modeling the mechanical part of this process in the software ANSYS. Computations have shown that the critical point is the intersection of tapes from different layers, where the raised edges of the tapes from a lower layer could imprint the tape in the upper layer [5].

Unexpectedly larger amount of investigations necessary for improving of magnetic cloaking quality, that was the main goal of the project, hindered to perform in planned extent the research aiming on two secondary goals, i.e. increasing of the range of applicable magnetic field and verification of the propulsion in non-uniform magnetic field. These activities were executed with limited effort and did not bring new substantial knowledge.