



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-19-0536

Vysokoteplotná supravodivá cievka pre motory elektrických a hybridných lietadiel

Zodpovedný riešiteľ **Mgr. Enric Pardo, PhD.**

Príjemca **Elektrotechnický ústav SAV, v. v. i.**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Elektrotechnický Ústav Slovenskej Akadémie Vied, v.v.i.

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

- Oswald Elektromotoren GmbH, Germany
- University of Cambridge, United Kingdom
- Karlsruhe Institute of Technology, Germany
- Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), Saclay, France
- University of Paris-Saclay, France
- Victoria University of Wellington, New Zealand
- Northeastern University, Shenyang, China
- University of Leicester, United Kingdom

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

-

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

Články:

1. Kováč, J., Kopera, L., Pardo, E. *, Melišek, T., Ries, R., Berberich, E., Wolfstädler S., and Reis, T.: Measurement of AC loss down to 25 K in a REBCO racetrack coil for electrical aircraft motor, Sci. Reports 12 (2022) 16454. Impact factor for 2021: 5.0
2. Ghabeli, A., Pardo, E. *, and Kapolka, M.: 3D modeling of a Superconducting Dynamo-Type Flux Pump, Sci. Rep. 11 (2021) 10296. Impact factor for 2020: 4.4
3. Dadhich, A. and Pardo, E.*: Modeling cross-field demagnetization of superconducting stacks and bulks for up to 100 tapes and 2 million cycles, Sci Rep. 10 (2020) 19265. Impact factor for 2019: 4.0
4. Li, S., Pardo, E*: Numerical modelling of soldered superconducting REBCO stacks of tapes suggests strong reduction in cross - field demagnetization, Sci. Rep., Impact factor for 2022: 4.6.
5. Dadhich, A., Li, S., Solovyov, M., Šouc, J., Mošať, M., and Pardo, E.*: Reducing cross-field demagnetization of superconducting stacks by soldering in pairs, Supercond. Sci Technol. 35 (2022) 115001. Impact factor for 2021: 3.5
6. Ghabeli, A. *, Ainslie, M., Pardo, E., Queval, L., and Mataira, R.: Modeling the charging

process of a coil by an HTS dynamo-type flux pump, Supercond. Sci Technol. 34 (2021) 084002, 11 strán. Impact faktor pre 2020: 3.2

7. Pardo, E.* and Dadhich, A.: Electro-thermal modelling by novel variational methods: racetrack coil in short-circuit, IEEE Trans. Applied Supercond. 33 (2023) 5201606. Impact faktor for 2022: 1.8

* Corresponding author.

Vedecké monografie:

1. Pardo, E. and Grilli, F.: Electromagnetic modeling of superconductors. In: Numerical modeling of superconducting applications: Simulation of electromagnetics, thermal stability, thermo-hydraulics and mechanical effects in large-scale superconducting devices. World Sci Publ. Co. Pte. Ltd., 2023, p. 1-104. ISBN 978-981-127-143-4

Vyžiadané prednášky:

1. E Pardo, A Dadhich, S Li, M Kapolka, M Soloviyov, M Mosat, J Kovac, J Souc: Modeling and measuring the cross field demagnetization of REBCO stacks and bulks for millions of cycles. In: Applied Superconductivity Conference 2020, USA (on-line).

2. E Pardo*, J Kovac, L Kopera, R Ries, F Grilli, E Berberich, T Reis: AC loss in the REBCO stator of a 1 MW motor for aviation. In: ISS 2020, Tsukuba, Japan (on-line).

Uplatnenie výsledkov projektu

Experimentálne aparatury, softvéry, výpočtové aj experimentálne metódy a ďalšie základné know-how ktoré boli vyvinuté v rámci projektu môžu slúžiť ako základ pre návrhy ďalších národných či medzinárodných projektov.

V tomto smere už boli skutočne využité pri príprave návrhu projektu pre Európsku vesmírnu agentúru (ESA), ktorého hlavný riešiteľ obhájil dizertačnú prácu počas trvania projektu a v súčasnosti je postdoktorandom na našom ústave (Anang Dadhich).

Tento projekt tiež umožnil začlenenie dvoch postdoktorandov do nášho ústavu (Anang Dadhich a Arpit K. Srivastava).

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

Elektrifikácia dopravy je kľúčovým aspektom na zníženie emisií a zmiernenie následkov klimatickej katastrofy. Pre komerčné lietadlá s viac ako 100 pasažiermi sa ako najvýhodnejšie ukazujú koncepcie elektrických lietadiel uvažujúce s výrobou elektrickej energie na palube lietadla s využitím palivových článkov na báze vodíka. Keďže kvapalný vodík má v týchto lietadlách teplotu až 20 K (-253 °C), je ho možné použiť aj pre chladenie supravodivých elektrických hnacích motorov, ktoré dosahujú pomer výkonu a hmotnosti potrebný pre komerčné letectvo. Počas riešenia projektu sme analyzovali viacero supravodivých častí takýchto motorov, pomocou počítačového modelovania i experimentálne. Vybudovali sme jedinečnú aparaturu pre merania energetických strát a tepelnej stability cievok z vysokoteplotných supravodičov (HTS), pri teplotách až 25 K. Vyvinuli sme tiež softvérové nástroje využívajúce inovatívne výpočtové metódy na predpovedanie elektromagnetických, tepelných a mechanických vlastností (a ich vzájomnej interakcie) HTS cievok a supravodivých magnetov (alebo supermagnetov) v týchto motoroch. Jedným z kľúčových zistení je, že spájkovanie supravodivých pások do stĺpcov vytvára supermagnety, ktoré sú veľmi odolné voči vysokofrekvenčným osciláciám magnetického poľa vyskytujúcim sa v týchto motoroch. Experimentálne sme tiež zistili, že vodný ľad je vynikajúcim tepelným stabilizačným médiom pre HTS cievky, pri jednosmernom či striedavom prúde. Pri použití vodného ľadu však dochádza k zníženiu maximálneho prípustného striedavého prúdu, v dôsledku zhoršenej tepelnej vodivosti medzi supravodičom a chladiacim médiom. Celkovo projekt splnil ciele vytýčené v návrhu a otvára dvere pre budúci kvalitný výskum s významným spoločenským dosahom.

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

Transport electrification is a key aspect in order to reduce emissions and attenuate the effects of climate disaster. For commercial airplanes with more than 100 passengers, the most feasible electric aircraft architectures use hydrogen-based fuel cells to generate the electricity on-board. Since liquid hydrogen in these airplanes is as cold as 20 K (-253°C), this liquid can also cool down superconducting electric propulsion motors, which can provide

the necessary power-over-weight ratio required for commercial aviation. During this project, we analyzed several superconducting parts of these motors by both computer modelling and experiments. Indeed, we built up a unique experimental set-up to measure high-temperature superconducting (HTS) coils for this motor, regarding their energy loss under alternating current and their thermal stability at temperatures as low as 25 K. We also developed software tools using innovative computational methods to predict the electro-magnetic, thermal and mechanical properties (and their mutual interaction) of HTS coils and superconducting magnets (or super-magnets) in these motors. Key findings are that soldering HTS together in stacks result in super-magnets that are very reliable to the high-frequency magnetic field oscillations that appear in these motors. As well, we experimentally found that water ice is an excellent thermal stabilization medium for HTS coils under both direct current or alternating current. However, water ice reduces the maximum possible alternating current due to worsened heat conductance between superconductor and cooling medium. This project fulfilled the objectives of the proposal and opens the door for future high-quality research with social impact.