

## Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-16-0059**

**Výskum nových magnetodielektrických keramických a kompozitných materiálových štruktúr**

Zodpovedný riešiteľ **doc. Ing. Rastislav Dosoudil, PhD.**

Príjemca **Slovenská technická univerzita v Bratislave - Fakulta elektrotechniky a informatiky**

### Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Ústav elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

### Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

-

### 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

[1] ŠOKA, Martin - UŠÁKOVÁ, Mariana - DOSOUDIL, Rastislav - UŠÁK, Elemír - LOKAJ, Ján. Effect of lanthanum substitution on structural and magnetic properties of nickel zinc ferrites. In AIP Advances. Vol. 8, iss. 4 (2018), article no. 047802 [6] s. ISSN 2158-3226. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85031667149.

[2] UŠÁK, Elemír - UŠÁKOVÁ, Mariana - DOSOUDIL, Rastislav - ŠOKA, Martin - DOBROČKA, Edmund. Influence of iron substitution by selected rare-earth ions on the properties of NiZn ferrite fillers and PVC magneto-polymer composites. In AIP Advances. Vol. 8, iss. 4 (2018), Art. no. 047805 [8] s. ISSN 2158-3226. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85031934340.

[3] KRUŽELÁK, Ján - SÝKORA, Richard - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Relationship between the cross-link structure and properties of peroxide and sulfur-cured magnetic composites based on NR and NBR. In Journal of Elastomers and Plastics. Vol. 49, iss. 6 (2017), s. 459-480. ISSN 0095-2443. V databáze: CC: 000415364800001.

[4] KRUŽELÁK, Ján - SÝKORA, Richard - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Magnetic Composites Prepared by Incorporation of Strontium Ferrite into Polar and Non-Polar Rubber Matrices. In Polymer Composites. Vol. 38, iss. 11 (2017), s. 2480-2487. ISSN 0272-8397. V databáze: CC: 000415812000016.

[5] ŠOKA, Martin - UŠÁKOVÁ, Mariana - DOSOUDIL, Rastislav - UŠÁK, Elemír - LOKAJ, Ján. Effect of lanthanum substitution on structural and magnetic properties of nickel zinc ferrites. In AIP Advances. Vol. 8, iss. 4 (2018), article no. 047802 [6] s. ISSN 2158-3226.

- [6] UŠÁK, Elemír - UŠÁKOVÁ, Mariana - DOSOUDIL, Rastislav - ŠOKA, Martin - DOBROČKA, Edmund. Influence of iron substitution by selected rare-earth ions on the properties of NiZn ferrite fillers and PVC magneto-polymer composites. In *AIP Advances*. Vol. 8, iss. 4 (2018), Art. no. 047805 [8] s. ISSN 2158-3226.
- [7] KRUŽELÁK, Ján - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Thermo-oxidative aging of rubber composites based on NR and NBR with incorporated strontium ferrite. In *Journal of Elastomers and Plastics*. Vol. 50, Iss. 1 (2018), s. 71-79. ISSN 0095-2443.
- [8] KRUŽELÁK, Ján - CHODÁK, Ivan - JOCHEC - MOŠKOVÁ, Daniela - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Cross-linking and properties of rubber magnetic composites cured with different curing systems. In *Polymers for Advanced Technologies*. Vol. 29, Iss. 1 (2018), s. 216-225. ISSN 1042-7147.
- [9] KRUŽELÁK, Ján - HUDEC, Ivan. Vulcanization systems for rubber compounds based on IIR and halogenated IIR: an overview. In *Rubber Chemistry and Technology*. Vol. 91, iss. 1 (2018), s. 167-183. ISSN 0035-9475.
- [10] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - DOSOUDIL, Rastislav. Thermo-oxidative stability of rubber magnetic composites cured with sulfur, peroxide and mixed curing systems. In *Plastics Rubber and Composites*. Vol. 74, iss. 7 (2018), s. 324-336. ISSN 1465-8011.
- [11] KRUŽELÁK, Ján - KARLÍKOVÁ, Viera - DOSOUDIL, Rastislav - TOMANOVÁ, Katarína - HUDEC, Ivan. Reinforcement of Rubber Magnetic Composites with Zinc Salts of Acrylic and Methacrylic Acids. In *Materials [elektronický zdroj]*. Vol. 11, iss. 11 (2018), s. 2161. ISSN 1996-1944.
- [12] KAPLAN, Norbert - JASENEK, Jozef - ČERVEŇOVÁ, Jozefa - UŠÁKOVÁ, Mariana. Magnetic optical FBG sensors using optical frequency-domain reflectometry. In *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 55, No. 1 (2019), Art. no. 4000704 [4] s. ISSN 0018-9464.
- [13] KAPLAN, Norbert - JASENEK, Jozef - ČERVEŇOVÁ, Jozefa - UŠÁKOVÁ, Mariana. Magnetic optical FBG sensors using optical frequency-domain reflectometry. In *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 55, No. 1 (2019), Art. no. 4000704 [4] s. ISSN 0018-9464
- [14] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - MEDLENOVÁ, Elena - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Application of peroxide curing systems in cross-linking of rubber magnets based on NBR and barium ferrite. In *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2019, (2019), Art. no. 1640548 [10] s. ISSN 1687-8434 85062263632
- [15] KRUŽELÁK, Ján - MATVEJOVÁ, Martina [Matvejová] - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Barium and strontium ferrite-filled composites based on NBR and SBR. In *Journal of Elastomers and Plastics*. Vol. 51, iss. 5 (2019), s. 421-439. ISSN 0095-2443
- [16] SLÁMA, Jozef - PALA, Jozef - ŠOKA, Martin - LOKAJ, Ján. Metamagnetic properties in Mn<sub>0.7</sub>Mg<sub>0.3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ferrite. In *Physica B-Condensed Matter*. Vol. 576, (2020), Art. no. 411705 [5] s. ISSN 0921-4526 (2019: 1.902 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.409 - SJR, Q2 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1016/j.physb.2019.411705 ; SCOPUS: 2-s2.0-85073503738 ; WOS: 000501335200012 ; CC: 000501335200012.
- [17] SLÁMA, Jozef - ŠOKA, Martin - UŠÁKOVÁ, Mariana - UŠÁK, Elemír. Effects of iron deficiency on magnetic properties of NiZn ferrites. In *Acta Physica Polonica A*. Vol. 137, Iss. 5 (2020), s. 892-895. ISSN 0587-4246 (2019: 0.579 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.214 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.12693/APhysPolA.137.892 ; SCOPUS: 2-s2.0-85088029565 ; CC: 000558676100095.
- [18] UŠÁKOVÁ, Mariana - UŠÁK, Elemír - DOSOUDIL, Rastislav - ŠOKA, Martin. Substituted lithium ferrite utilized as magnetically active filler for composites with acrylonitrile butadiene rubber matrix. In *Acta Physica Polonica A*. Vol. 137, Iss. 5 (2020), s. 831-834. ISSN 0587-4246 (2019: 0.579 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.214 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.12693/APhysPolA.137.831 ; CC: 000558676100077.
- [19] DOSOUDIL, Rastislav - LISÝ, Kornel - KRUŽELÁK, Ján. Permeability, permittivity and EM-wave absorption properties of polymer composites filled with MnZn ferrite and carbon black. In *Acta Physica Polonica A*. Vol. 137, Iss. 5 (2020), s. 827-830. ISSN 0587-4246 (2019: 0.579 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.214 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.12693/APhysPolA.137.827 ; CC: 000558676100076 ; SCOPUS: 2-s2.0-85087978090.
- [20] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - UŠÁK, Elemír - UŠÁKOVÁ, Mariana - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Rubber magnets based on NBR and lithium ferrite with the ability to absorb electromagnetic radiation. In *Polymers for Advanced Technologies*. Vol. 31, Iss. 7 (2020), s. 1624-1633. ISSN 1042-7147 (2019: 2.578 - IF, Q2 - JCR Best Q,

- 0.562 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000517743300001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85081039809 ; DOI: 10.1002/pat.4891.
- [21] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - PLAVEC, Roderik - UŠÁK, Elemír - UŠÁKOVÁ, Mariana - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan. Low frequency electromagnetic shielding efficiency of composites based on ethylene propylene diene monomer and multi-walled carbon nanotubes. In *Polymers for Advanced Technologies*. Vol. 31, iss. 12 (2020), s. 3272-3280. ISSN 1042-7147 (2019: 2.578 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.562 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1002/pat.5051 ; CC: 000584623100032.
- [22] KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - KRUŽELÁK, Ján - MEDLENOVÁ, Elena - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan - GOŘALÍK, Marek. Rubber magnets cured with peroxide and coagents. In *Journal of Elastomers and Plastics*. Vol. 52, iss. 3 (2020), s. 253-270. ISSN 0095-2443 (2019: 1.200 - IF, Q4 - JCR Best Q, 0.324 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1177/0095244319846176; SCOPUS: 2-s2.0-85065334045 ; CC: 000523822800004.
- [23] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - DOSOUDIL, Rastislav - TOMANOVÁ, Katarína - HUDEC, Ivan - VILČÁKOVÁ, Jarmila. Sulfur and peroxide curing of rubber magnetic composites with the application of zinc methacrylate = Sírna a peroxidová vulkanizácie elastomérených magnetických kompozitov s využitím zinkovej soli kyseliny metakrylovej. In *Journal of Elastomers and Plastics*. Vol. 53, iss. 2 (2021), s. 123-145. ISSN 0095-2443 (2020: 1.833 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.337 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1177/0095244320915621; SCOPUS: 2-s2.0-85083244830 ; CC: 000616642500003 ; WOS: 000616642500003.
- [24] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - HLOŽEKOVÁ, Klaudia - DOSOUDIL, Rastislav - GOŘALÍK, Marek - HUDEC, Ivan. Electromagnetic interference shielding and physical-mechanical characteristics of rubber composites filled with manganese-zinc ferrite and carbon black. In *Polymers*. Vol. 13, iss. 4 (2021), Art. no. 616 [15] s. ISSN 2073-4360 (2020: 4.329 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.770 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.3390/polym13040616 ; CC: 000624256900001; WOS: 000624256900001 ; SCOPUS: 2-s2.0-85101806223.
- [25] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - HLOŽEKOVÁ, Klaudia - PLAVEC, Roderik - DOSOUDIL, Rastislav - GOŘALÍK, Marek - VILČÁKOVÁ, Jarmila - HUDEC, Ivan. Mechanical, thermal, electrical characteristics and emi absorption shielding effectiveness of rubber composites based on ferrite and carbon fillers. In *Polymers*. Vol. 13, iss. 17 (2021), Art. no. 2937 [21] s. ISSN 2073-4360 (2020: 4.329 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.770 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000694415700001; WOS: 000694415700001; SCOPUS: 2-s2.0-85114209143 ; DOI: 10.3390/polym13172937.
- [26] KRUŽELÁK, Ján - KVASNIČÁKOVÁ, Andrea - DOSOUDIL, Rastislav - HUDEC, Ivan - VILČÁKOVÁ, Jarmila. Combined sulfur and peroxide curing systems applied in cross-linking of rubber magnets. In *Polymers & Polymer Composites*. Vol. 29, iss. 8 (2021), s. 1155-1166. ISSN 0967-3911 (2020: 2.000 - IF, Q2 - JCR Best Q, 0.289 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.1177/0967391120956508 ; SCOPUS: 2-s2.0-85090562371 ; CC: 000707723800006.
- [27] UŠÁK, Elemír - UŠÁKOVÁ, Mariana. Fast digital feedback algorithm for efficient control of magnetic flux density waveforms. In *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. Vol. 70, (2021), Art. no. 6012108 [8] s. ISSN 0018-9456 (2020: 4.016 - IF, Q1 - JCR Best Q, 0.820 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000722002500015 ; WOS: 000722002500015; SCOPUS: 2-s2.0-85118625475; DOI: 10.1109/TIM.2021.3124836 ; IEEE: 9599714.
- [28] DOSOUDIL, Rastislav - ŠOKA, Martin - UŠÁKOVÁ, Mariana - UŠÁK, Elemír - JANČÁRIK, Vladimír - DOBROČKA, Edmund. Magnetic and Structural Properties Analysis of Cerium Substituted Nickel Zinc Ferrites. In *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol., No. (2021), Art. No. [ ] s. ISSN 0018-9464 DOI: 10.1109/TMAG.2021.3092581 (v tlači)

### Uplatnenie výsledkov projektu

Vzhľadom na charakter projektu (určený pre základný výskum) predpokladáme, že dosiahnuté výsledky sa budú dať uplatniť v priemyselnej praxi tak doma ako i v zahraničí pri návrhu a výrobe rôznych zariadení a systémov hlavne v oblasti vysokofrekvenčnej techniky, automobilovej mechatroniky a elektromagnetickej kompatibility.

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

Optimalizácia (s ohľadom na konkrétnu aplikáciu) elektromagnetických vlastností NiZn spinelových feritov malým prídavkom iného iónu (Y, La, Eu, Gd, Tb, Ho, Er, Ce, Dy, Er, In, Nd) a vhodnej metódy syntézy (inovovaná prekursorová a keramická metóda), ukázala na významné zmeny skúmaných štruktúrnych a magnetických vlastností. Bol detegovaný metamagnetizmus v systéme MnMg (prechod z antiferomagnetického na feromagnetický stav pod vplyvom teploty pri pôsobení zvoleného externého magnetického poľa). Pripravili sme kompozitné materiály na báze rôznych plnív (spinelové a hexagonálne ferity a rôzne alotropné formy uhlíka) a polymérnej matrice (PVC, kaučukové matrice) s cieľom zlepšenia ich elektromagnetických materiálových parametrov (permeabilita, permitivita), elektromagnetických absorpčných vlastností (odrazové straty) a fyzikálno-mechanických vlastností (pevnosť v ťahu, ťažnosť, tvrdosť). Malý prídavok elektricky vodivého plniva (vo forme rôznych alotropných foriem uhlíka) do magnetického (feritového) plniva viedlo k zlepšeniu fyzikálno-mechanických vlastností kompozitov a tiež k posunu maxima absorpcie elektromagnetického žiarenia do oblasti frekvencií nad 3 GHz. Navrhol, realizoval a verifikoval sa optický vláknový senzor na báze Braggovskej mriežky (určeného na priestorové snímanie vektora magnetickej indukcie) s veľkou citlivosťou a dynamickým rozsahom. Modernizovalo sa existujúce pracovisko pre meranie magnetických a elektromagnetických absorpčných vlastností pripravených materiálov (rozšírenie frekvenčného rozsahu merania komplexnej permeability a permitivity vzoriek materiálov nad 3 GHz) a inovovalo sa technologické zariadenie na optimálnu homogenizáciu vstupných surovín využívaných pri príprave vyvíjaných materiálov (modernizácia mletieho zariadenia s možnosťou regulácie času homogenizácie a rýchlosti počtu otáčok za jednotku času a inovácia výhrevného zariadenia s možnosťou dlhšej homogenizácie východiskového roztoku pri konštantnej teplote). Vedecké ciele projektu boli splnené v plnom rozsahu.

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

Optimization (with respect to the specific application) of electromagnetic properties of NiZn spinel ferrites by small addition of another ion (Y, La, Eu, Gd, Tb, Ho, Er, Ce, Dy, Er, In, Nd) and suitable synthesis method (innovated precursor and ceramic method), showed significant changes in the investigated structural and magnetic properties. A metamagnetism was detected in the MnMg system (transition from antiferromagnetic to ferromagnetic state under the influence of temperature under the action of the selected external magnetic field). We have prepared composite materials based on various fillers (spinel and hexagonal ferrites and various allotropic forms of carbon) and polymer matrix (PVC, rubber matrices) in order to improve their electromagnetic material parameters (permeability, permittivity), electromagnetic absorption properties (return losses) and physical-mechanical properties (tensile strength, elongation at break, hardness). The small addition of electrically conductive filler (in the form of various allotropic forms of carbon) to the magnetic (ferrite) filler led to improved physical-mechanical properties of composites and also to a shift of the maximum absorption of electromagnetic radiation in the frequency range above 3 GHz. An optical fiber sensor based on the Bragg grating (designed for spatial sensing of the magnetic induction vector) with high sensitivity and dynamic range was designed, implemented and verified. The existing workplace for measuring magnetic and electromagnetic absorption properties of prepared materials was modernized (extension of frequency range of complex permeability and permittivity measurement of material samples above 3 GHz) and technological equipment for optimal homogenization of input raw materials used in preparation of developed materials was modernized (modernization of grinding equipment with regulation of homogenization time and speed per unit time, and innovation of the heating device with the possibility of longer homogenization of the starting solution at a constant temperature). The scientific objectives of the project were fully met.