

ABSTRACT AND REFERENCES

APPLIED PHYSICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354694

THE INFLUENCE OF MAGNETIC SHIELDING TECHNIQUE ON THE MAGNETIC FIELD TOPOLOGY IN AN ACCELERATING CHANNEL OF THE HALL-EFFECT THRUSTER (p. 6–13)**Olexandr Petrenko**Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5648-5068>**Viktor Pererva**Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8803-5360>

This study investigates magnetic system in the ST-40-type Hall-effect thruster and its modification with magnetic shielding of the accelerating channel. The task addressed relates to the lack of systematic quantitative data on the influence of magnetic shielding techniques on the topology of the magnetic field in the channel. The associated parameters that affect the erosion of the walls and the stability of the engine operating modes remain undefined.

This work reports mathematical modeling of the magnetic field topology for the engine of the classical scheme and two variants of magnetic shielding: with an external magnetic shield and using a magnetically soft hollow anode. Spatial distributions of the radial component of the field induction were determined and induction gradients along the axis of the accelerating channel were derived. It is shown that for the classical scheme the maximum induction gradient is about 0.67 T/m. The external magnetic shield increases it to 1.17 T/m, and the hollow anode – to 1.29 T/m, that is, 1.7–1.9 times.

The results are explained by a change in magnetic resistance and redistribution of magnetic flux, which leads to deformation of the lines of force, their orientation along the dielectric walls of the channel, and removal of the maximum magnetic field induction beyond the engine section. A distinctive feature of this study is a direct quantitative comparison of the magnetic field topology for different design schemes on a single geometric and current basis, which made it possible to objectively assess the effectiveness of each variant of magnetic shielding.

The implementation of results is possible in the design and optimization of magnetic systems of Hall engines of medium power class under conditions close to laboratory and ground tests. Their application could contribute to reducing erosion, increasing discharge stability, and increasing the resource.

Keywords: Hall-effect thruster, magnetic shielding, magnetic field topology, acceleration channel, simulation.

References

- Kim, V. P. (2017). On the longitudinal distribution of electric field in the acceleration zones of plasma accelerators and thrusters with closed electron drift. *Plasma Physics Reports*, 43 (4), 486–498. <https://doi.org/10.1134/s1063780x17040055>
- Mikellides, I. G., Katz, I., Hofer, R. R., Goebel, D. M., de Grys, K., Mathers, A. (2011). Magnetic shielding of the channel walls in a Hall plasma accelerator. *Physics of Plasmas*, 18 (3). <https://doi.org/10.1063/1.3551583>
- Mikellides, I. G., Katz, I., Hofer, R. R., Goebel, D. M. (2014). Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. I. Theory and validation. *Journal of Applied Physics*, 115 (4). <https://doi.org/10.1063/1.4862313>
- de Grys, K., Mathers, A., Welander, B., Khayms, V. (2010). Demonstration of 10,400 Hours of Operation on 4.5 kW Qualification Model

Hall Thruster. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. <https://doi.org/10.2514/6.2010-6698>

- Goebel, D. M., Katz, I., Mikellides, I. G. (2024). *Fundamentals of Electric Propulsion*. Wiley. Available at: <https://search.catalog.loc.gov/instances/6347bd67-d681-5525-a0e3-7eb73345fdb?option=lccn&query=2023023149>
- Garrigues, L., Hagelaar, G. J. M., Bareilles, J., Boniface, C., Boeuf, J. P. (2003). Model study of the influence of the magnetic field configuration on the performance and lifetime of a Hall thruster. *Physics of Plasmas*, 10 (12), 4886–4892. <https://doi.org/10.1063/1.1622670>
- Liu, Q., Li, Y., Hu, Y., Mao, W. (2023). Effects of Magnetic Field Gradient on the Performance of a Magnetically Shielded Hall Thruster. *Aerospace*, 10 (11), 942. <https://doi.org/10.3390/aerospace10110942>
- Yang, L., Zhang, T., Chen, J., Jia, Y. (2018). Numerical study of low-frequency discharge oscillations in a 5 kW Hall thruster. *Plasma Science and Technology*, 20 (7), 075503. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aac012>
- Hofer, R. R., Polk, J. E., Sekerak, M. J., Mikellides, I. G., Kamhawi, H., Sarver-Verhey, T. R. et al. (2016). The 12.5 kW Hall Effect Rocket with Magnetic Shielding (HERMeS) for the Asteroid Redirect Robotic Mission. 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2016-4825>
- Hofer, R., Lobbia, R., Chaplin, V., Ortega, A., Mikellides, I., Polk J. et al. (2019). Completing the Development of the 12.5 kW Hall Effect Rocket with Magnetic Shielding (HERMeS). The 36th International Electric Propulsion Conference. University of Vienna. Available at: <https://electricrocket.org/2019/193.pdf>
- Kamhawi, H., Huang, W., Mikellides, I. G. (2018). Optimization of the Magnetic Field Topology in the Hall Effect Rocket with Magnetic Shielding. 2018 Joint Propulsion Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4720>
- Mikellides, I. G., Hofer, R. R., Katz, I., Goebel, D. M. (2014). Magnetic shielding of Hall thrusters at high discharge voltages. *Journal of Applied Physics*, 116 (5). <https://doi.org/10.1063/1.4892160>
- Petrenko, O., Troyan, A., Pererva, V. (2023). Parameters of the ST-40MS hall thruster with increased power discharge supply. *Journal of Rocket-Space Technology*, 31 (4), 50–58. <https://doi.org/10.15421/452307>
- Meecker, D. (2015). *Finite Element Method Magnetics (Version 4.2)*. Available at: <https://www.femm.info>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359146

DETERMINING DISPERSION CHARACTERISTICS OF RECTANGULAR WAVEGUIDE WITH NARROW IMPEDANCE WALLS (p. 14–24)**Ludmila Logacheva**Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2366-9754>**Tetiana Bugrova**Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1701-9771>**Mikhail Chornoborodov**Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1230-9374>**Sergii Morshchavka**Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6793-8728>**Natalia Chornoborodova**Research and Production Firm "SWEDA" LTD, Zaporizhzhia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4306-0862>

This study explores a rectangular metal waveguide with narrow impedance walls, described by equivalent impedance-type boundary conditions. The task addressed is to build an effective mathematical model for analyzing waveguides with non-ideally conducting and irregular boundary surfaces, by determining their dispersion characteristics and wave propagation constants.

An approach based on the Fourier method and Leontovych impedance boundary conditions has been proposed. This has made it possible to avoid the complications associated with the vector statement of the problem and obtain transcendental equations for determining the propagation constants of bulk and surface waves. The dispersion equation was analytically solved and the eigenwave parameters were calculated in a wide range of surface impedance values.

The analytical results made it possible to verify correctness of the approach from a physical point of view; they could facilitate the optimization of parameters for the basic structure to the requirements of a specific microwave device. This is due to the use of an impedance boundary condition model, which adequately takes into account the influence of losses and reactive properties of the surface on electromagnetic fields and wave propagation processes in the waveguide.

In practice, the proposed approach could be used for the analysis and design of complex periodic microwave structures, in particular, filters, directional couplers, as well as power distribution elements between phased array antenna elements. Through the generalization of research results in the form of normalization of the impedance and spectral characteristics of the basic waveguide structure, the obtained characteristics could be used to design microwave devices in the range from decimeter to millimeter wavelengths.

Keywords: propagation constant, boundary conditions, surface waves, dispersion characteristics, surface impedance, filters of harmonics.

References

- Gowrish, B., Mansour, R. R. (2020). A Novel Bandwidth Reconfigurable Waveguide Filter for Aerospace Applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30 (6), 577–580. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2020.2989283>
- Yuferev, S. V. (2009). *Surface Impedance Boundary Conditions*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315219929>
- Guha, R., Wang, X., Tang, X., Varshney, A. K., Ghosh, S. K., Datta, S. K. et al. (2021). Metamaterial assisted microwave tubes: a review. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36 (9), 1189–1211. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.2016499>
- Gaucher, S., Guiffaut, C., Bui, N., Reineix, A., Cessenat, O. (2023). Angle-Dependent Face-Centered SIBC Model of Metamaterial in Conformal FDTD Methods. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 71 (9), 7438–7446. <https://doi.org/10.1109/tap.2023.3297330>
- Larson, M. G., Bengzon, F. (2013). *The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Applications*. Texts in Computational Science and Engineering. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-33287-6>
- Beilina, L., Ruas, V. (2022). On the Maxwell-wave equation coupling problem and its explicit finite-element solution. *Applications of Mathematics*, 68 (1), 75–98. <https://doi.org/10.21136/am.2022.0210-21>
- Jiang, H., Córcoles, J., Ruiz-Cruz, J. A. (2025). Fusing Leontovich Boundary Conditions and Scalar 2-D FEM to Compute Lid and Lateral Wall Losses in H-Plane Waveguide Devices. *IEEE Microwave and Wireless Technology Letters*, 35(6), 764–767. <https://doi.org/10.1109/lmwt.2025.3557266>
- Hinojosa, J., Máximo-Gutiérrez, C., Alvarez-Melcon, A. (2023). Design of Evanescent Mode Band-Pass Filters Based on Groove Gap Waveguide Technology. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4332500>
- Marini, S., Rueda, A. S., Soto, P., Nieves, E. G., Boria, V. E. (2026). Design of Low-Pass Corrugated Filters Based on Half-Mode Groove Gap Waveguide Technology. *Electronics*, 15 (1), 234. <https://doi.org/10.3390/electronics15010234>
- Zhou, K., Wu, K. (2023). Substrate Integrated Waveguide Multiband Bandpass Filters and Multiplexers: Current Status and Future Outlook. *IEEE Journal of Microwaves*, 3 (1), 466–483. <https://doi.org/10.1109/jmw.2022.3227131>
- Shen, Y., Zhang, T., Luo, L., Zhu, H., Chen, L. (2025). 4 × 4 Wideband Slot Antenna Array Fed by TE₄₄₀ Mode Based on Groove Gap Waveguide. *Electronics*, 14 (4), 813. <https://doi.org/10.3390/electronics14040813>
- Zaghani, A., Hasnaoui, A., Sayari, S. (2024). Analysis of a Weak Galerkin Mixed Formulation for Maxwell's Equations. *Kragujevac Journal of Mathematics*, 50 (3), 387. <https://doi.org/10.46793/kgjmat2603.387z>
- Abdikalikova, G. (2025). Solvability of the Boundary Value Problem for a System of Parabolic Equations. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 49 (5), 4328–4339. <https://doi.org/10.1002/mma.70348>
- Shusharin, M. M., Svetkin, M. I., Bogolyubov, A. N., Erokhin, A. I. (2021). Mathematical Modeling of Infinite Waveguides with Inhomogeneous Losses. 2021 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 92–97. <https://doi.org/10.1109/piers53385.2021.9694768>
- Osipov, A. V. (2021). A Semi-Analytical Solution of the Impedance-Wedge Problem. 2021 *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 193. <https://doi.org/10.1109/iceaa52647.2021.9539554>
- Zhang, R. (2021). Numerical methods for scattering problems in periodic waveguides. *Numerische Mathematik*, 148 (4), 959–996. <https://doi.org/10.1007/s00211-021-01229-0>
- Divakov, D. V., Tyutyunnik, A. A. (2022). Symbolic Investigation of the Spectral Characteristics of Guided Modes in Smoothly Irregular Waveguides. *Programming and Computer Software*, 48 (2), 80–89. <https://doi.org/10.1134/s0361768822020049>
- Heinlein, A., Klawonn, A., Lanser, M., Weber, J. (2021). Combining machine learning and domain decomposition methods for the solution of partial differential equations—A review. *GAMM-Mitteilungen*, 44 (1). <https://doi.org/10.1002/gamm.202100001>
- Anaya, S. G., Moura, H. G., Teodoro, E. B., Miranda, R. F. d., Muñoz, D. M. (2025). A comprehensive digital waveguide formulation using the impedance method for acoustic simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 224, 112047. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112047>
- Arab, H., Wang, D., Wu, K., Dufour, S. (2022). A Full-Wave Discontinuous Galerkin Time-Domain Finite Element Method for Electromagnetic Field Mode Analysis. *IEEE Access*, 10, 125243–125253. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3222359>
- Wang, P., Shi, Y., Ban, Z. G., Zhu, S. C., Yang, Q., Li, L. (2020). Penalty Factor Threshold and Time Step Bound Estimations for Discontinuous Galerkin Time-Domain Method Based on Helmholtz Equation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68 (11), 7494–7506. <https://doi.org/10.1109/tap.2020.2998585>
- Feng, H., Chen, C., Wang, Y.-D., Wang, Y.-Y., Chen, H., Yin, W.-Y., Zhan, Q. (2025). A Superconvergent Discontinuous Galerkin Method Alleviating Numerical Dispersion in High-Frequency Wave Modeling. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 73 (11), 8573–8584. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2025.3591719>
- Franklin, J. (2025). Green's Functions for Neumann Boundary Conditions. *Mathematics*, 13 (21), 3399. <https://doi.org/10.3390/math13213399>
- Abdullin, R., Narudinov, R. (2021). Propagation Constant in Tapered Segment of Slotted Rectangular Waveguide. 2021 *29th Telecommunications Forum (TELFOR)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/telfor52709.2021.9653384>

25. Huéscar de la Cruz, A. M., Gómez Molina, C., Quesada Pereira, F. D., Álvarez Melcón, A., Boria Esbert, V. E. (2024). Efficient Integral Equation Analysis of 3-D Rectangular Waveguide Microwave Circuits by Using Green's Functions Accelerated With the Ewald Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 72 (10), 5709–5720. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2024.3388193>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354290
DEVELOPMENT OF IPSO-TVAC FOR ADAPTIVE CONTROL OF GRID-FORMING INVERTERS IN LOW SCR GRIDS WITH HARDWARE CONSTRAINTS (p. 25–35)

Pham Hong Thanh

Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh, Vietnam
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3463-7099>

Le Van Dai

Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh, Vietnam
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9312-0025>

The object of the study is the REGFM-B1-based battery energy storage system (BESS) grid-forming inverter control system operating in weak grids with a short-circuit ratio (SCR) below 2.0. The work focuses on optimizing the virtual synchronous machine (VSM) controller parameters using an improved particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients (IPSO-TVACs). The primary challenge addressed is the failure of conventional tuning methods to converge under three concurrent hardware constraints, including current saturation at 1.2 pu, measurement latency of 10 ms, and ADC quantization noise of 0.01 pu, which form a non-convex search landscape. The proposed IPSO-TVAC is benchmarked against standard PSO (Std-PSO) and gradient-based algorithms, which often converge to physically infeasible solutions under the specified hardware restrictions. The findings reveal that IPSO-TVAC greatly outperforms the standard approaches, with integral of time-weighted absolute error (ITAE) decreased by 16.1%, convergence standard deviation below 1×10^{-4} , and active power ripple lowered from 0.03 pu to below 0.005 pu. These gains suggest that IPSO-TVAC is highly effective in robust transient performance across all investigated constraint combinations. The method's major benefit lies in its fractional-order inertia decay and derivative-penalized cost function, which enable simultaneous management of current-saturation non-convexity and ADC noise sensitivity within a single optimization cycle. The findings imply that IPSO-TVAC is especially advantageous for utility-scale battery storage in distant microgrids, island-grid and offshore wind farms, where consistent frequency stability under inverter overcurrent restrictions and ADC noise during grid transitions is critical.

Keywords: grid-forming inverter, REGFM-B1, IPSO-TVAC, Low-SCR weak grids, BESS, hardware constraints.

References

- Lin, Y., Eto, J. H., Johnson, B. B., Flicker, J. D., Lasseter, R. H., Pico, H. N. V. et al. (2020). Research roadmap on grid-forming inverters. National Renewable Energy Lab. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>
- Integrating inverter-based resources into low short circuit strength systems (2017). North American Electric Reliability Corporation (NERC) Atlanta, GA, USA.
- 2800-2022 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2022.9762253>
- Zhong, Q.-C., Weiss, G. (2011). Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (4), 1259–1267. <https://doi.org/10.1109/tie.2010.2048839>
- Bevrani, H., Ise, T., Miura, Y. (2014). Virtual synchronous generators: A survey and new perspectives. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 54, 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.07.009>
- Alipoor, J., Miura, Y., Ise, T. (2015). Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (2), 451–458. <https://doi.org/10.1109/jestpe.2014.2362530>
- Tang, W., Li, B., Shao, X., Ye, Y., Yu, Y., Chen, J. (2025). An Adaptive Inertia and Damping Control Strategy for Virtual Synchronous Generators to Enhance Transient Performance. *Energies*, 19 (1), 204. <https://doi.org/10.3390/en19010204>
- Roveri, A., Mallema, V., Mandrile, F., Bojoi, R. (2025). Enhanced Virtual Synchronous Machine With Online Grid Impedance Estimation. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 6, 427–444. <https://doi.org/10.1109/ojia.2025.3584050>
- Baeckeland, N., Yang, B., Seo, G.-S. (2025). Transient Stability-Enhancing Method for Grid-Forming Inverters Under Current Limiting. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 40 (5), 6714–6725. <https://doi.org/10.1109/tpe.2025.3532490>
- Elwakil, M. M., Zoghaby, H. M. E., Sharaf, S. M., Mosa, M. A. (2023). Adaptive virtual synchronous generator control using optimized bang-bang for Islanded microgrid stability improvement. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 8 (1). <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00333-7>
- Baeckeland, N., Chatterjee, D., Lu, M., Johnson, B., Seo, G.-S. (2024). Overcurrent Limiting in Grid-Forming Inverters: A Comprehensive Review and Discussion. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39 (11), 14493–14517. <https://doi.org/10.1109/tpe.2024.3430316>
- Oboreh-Snapps, O., She, B., Fahad, S., Chen, H., Kimball, J., Li, F. et al. (2024). Virtual Synchronous Generator Control Using Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Method. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 39 (1), 214–228. <https://doi.org/10.1109/tec.2023.3309955>
- Kweon, J., Jing, H., Li, Y., Monga, V. (2024). Small-signal stability enhancement of islanded microgrids via domain-enriched optimization. *Applied Energy*, 353, 122172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122172>
- Li, X., Clerc, M. (2018). Swarm Intelligence. *Handbook of Metaheuristics*, 353–384. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_11
- IEC 61400-1: Wind turbines – Part 1: Design requirements (2005). International Electrotechnical Commission. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/12556/5a25eb41347f46b9b293e5f30c8eb7a4/IEC-61400-1-2005.pdf>
- Buso, S., Mattavelli, P. (2006). Digital Control in Power Electronics. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02495-5>
- Nassef, A. M., Abdelkareem, M. A., Maghrabie, H. M., Baroutaji, A. (2023). Review of Metaheuristic Optimization Algorithms for Power Systems Problems. *Sustainability*, 15 (12), 9434. <https://doi.org/10.3390/su15129434>
- Rivas-Martínez, G. I., Rodas, J., Herrera, E., Doval-Gandoy, J. (2025). A Novel Approach to Performance Evaluation of Current Controllers in Power Converters and Electric Drives Using Non-Parametric Analysis. *IEEE Latin America Transactions*, 23 (1), 68–77. <https://doi.org/10.1109/latl.2025.10810402>
- 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2018.8332112>
- Ratnaweera, A., Halgamuge, S. K., Watson, H. C. (2004). Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer With Time-Varying

- Acceleration Coefficients. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8 (3), 240–255. <https://doi.org/10.1109/tevc.2004.826071>
21. Syed, D., Shaikh, G. M., Alshahrani, H. M., Hamdi, M., Alsulami, M., Shaikh, A., Rizwan, S. (2024). A Comparative Analysis of Meta-heuristic Techniques for High Availability Systems. *IEEE Access*, 12, 7382–7398. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3352078>
 22. Teodorescu, R., Liserre, M., Rodríguez, P. (2010). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470667057>
 23. Muñoz-Torrero, D., García-Quismondo, E., Ventosa, E., Prodanovic, M., Palma, J. (2025). On the degradation of lithium-ion batteries over a current ripple effect. *Electrochimica Acta*, 530, 146326. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146326>
 24. Milano, F., Dörfler, F., Hug, G., Hill, D. J., Verbič, G. (2018). Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems (Invited Paper). 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), 1–25. <https://doi.org/10.23919/pssc.2018.8450880>
 25. Xu, X., Yousefian, R., Elkhatib, M., Choi, B., Huang, L., Mao, Y., Berner, A. (2019). Automatic Underfrequency Load Shedding Study of the PJM System. 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 1–5. <https://doi.org/10.1109/pesgm40551.2019.8973420>
 26. Grigsby, L. L. (Ed.) (2017). *Power System Stability and Control*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/b12113>
 27. Ohuchi, K., Masod, A. F. B., Kato, S., Hirase, Y. (2023). Stability analysis of virtual synchronous generator control in a high-voltage DC transmission system using impedance-based method. *Energy Reports*, 9, 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.077>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357609

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF HEAT EXCHANGE IN ELECTRONIC DEVICES WITH SEMI-THROUGH FOREIGN ELEMENTS (p. 36–43)

Vasyl Havrysh

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3092-2279>

Svitlana Yatsyshyn

Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5200-4837>

Lubov Kolyasa

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9690-8042>

Mykhailo Stepaniak

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1859-4495>

Andrii Kapustianskyi

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2771-2505>

This study investigates heat exchange processes in isotropic spatial environments with foreign semi-through elements subjected to external and internal thermal loads.

Significant temperature gradients arise as a result of the thermal load. To establish and analyze temperature regimes for effective operation of electronic devices, mathematical models for determining temperature fields have been constructed.

Based on the formulated boundary value problems of thermal conductivity, their analytical and numerical solutions have been defined. Using these solutions, numerical calculations of the temperature distribution in spatial coordinates for given geometric and thermophysical parameters have been performed.

For an effective description of the thermal conductivity coefficient for inhomogeneous spatial media, asymmetric unit functions were used. A technique for segment-constant approximation of temperature as a function of spatial coordinates on the surfaces of foreign elements has been introduced. As a result, second-order differential equations with partial derivatives and discontinuous and singular coefficients have been derived.

The numerical results reflect temperature distribution in the media in spatial coordinates for the given geometric and thermophysical parameters. The number of partitions of the intervals $(0; h)$, $(-H; H)$, $(0; R)$ was chosen to be equal to 9. That has made it possible to obtain numerical values of temperature with an accuracy of 10^{-6} . The constructed mathematical models of heat transfer make it possible to analyze spatial isotropic media with foreign through-going elements in terms of their thermal stability.

Keywords: temperature field, thermal conductivity of the material, thermal resistance of structures, heat transfer, semi-through foreign elements.

References

1. Zhuravchak, L. M., Zabrodska, N. V. (2025). Solving inverse problem of the potential theory by the cascade algorithm and the near-boundary element method. *Mathematical Modeling and Computing*, 12 (4), 1243–1253. <https://doi.org/10.23939/mmc2025.04.1243>
2. Bartwal, N., Shahane, S., Roy, S., Vanka, S. P. (2023). Simulation of heat conduction in complex domains of multi-material composites using a meshless method. *Applied Mathematics and Computation*, 457, 128208. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2023.128208>
3. Lach, L., Svyetlichnyy, D. (2025). Advances in Numerical Modeling for Heat Transfer and Thermal Management: A Review of Computational Approaches and Environmental Impacts. *Energies*, 18 (5), 1302. <https://doi.org/10.3390/en18051302>
4. Channouf, S., Benhamou, J., Jami, M. (2024). Investigating convective and conductive heat transfer in square and circular heated bodies: A novel approach using coupled Runge-Kutta and lattice Boltzmann method. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102441. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102441>
5. Bi, D., Jiang, M., Chen, H., Liu, S., Liu, Y. (2020). Effects of thermal conductivity on the thermal contact resistance between non-conforming rough surfaces: An experimental and modeling study. *Applied Thermal Engineering*, 171, 115037. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115037>
6. Shen, F., Li, Y.-H., Güler, M. A., Wu, H.-D., Shen, W.-W., Ke, L.-L. (2025). A high-efficiency prediction method for thermal contact resistance of rough surfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 167, 109325. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109325>
7. Jiang, G., Chen, W., Chen, J., Yang, W. (2026). Experimental Investigation of Thermal Contact Resistance at Flat/Curved Surface Interfaces Under Various Temperature, Pressure, and Surface Roughness Levels. *Technologies*, 14 (1), 41. <https://doi.org/10.3390/technologies14010041>
8. Chumak, K. A., Martynyak, R. M. (2018). Effective Thermal Contact Resistance of Regularly Textured Bodies in the Presence of Intercontact Heat-Conducting Media and the Phenomenon of Thermal Rectification. *Journal of Mathematical Sciences*, 236 (2), 160–171. <https://doi.org/10.1007/s10958-018-4103-7>
9. Silva, D. (2022). Modeling the Transient Response of Thermal Circuits. *Applied Sciences*, 12 (24), 12555. <https://doi.org/10.3390/app122412555>
10. Chandra, S., Chowdhury, S. S., Roy, K. (2025). 2D-TherMAL: Physics-Informed Framework for Thermal Analysis of Circuits using Generative AI. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. <https://doi.org/10.1109/tcad.2025.3642715>

11. Padmanabhan, N. (2024). A Transient Thermal Model for Power Electronics Systems. *SoutheastCon 2024*, 1294–1299. <https://doi.org/10.1109/southeastcon52093.2024.10500091>
12. Zorzetto, M., Torchio, R., Lucchini, F., Massei, S., Robol, L., Dughiero, F. (2024). Reduced Order Modeling for Thermal Simulations of Electric Components With Surface-to-Surface Radiation. *IEEE Access*, 12, 178117–178126. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3507367>
13. Havrysh, V., Kochan, V. (2023). Mathematical Models to Determine Temperature Fields in Heterogeneous Elements of Digital Devices with Thermal Sensitivity Taken into Account. *2023 IEEE 12th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 983–991. <https://doi.org/10.1109/idaacs58523.2023.10348875>
14. Havrysh, V., Kolyasa, L. (2026). Mathematical modeling and analysis of heat transfer in structures with foreign elements. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 34–42. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2026-1/034>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354694

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБУ МАГНІТНОГО ЕКРАНУВАННЯ НА ТОПОЛОГІЮ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПРИСКОРЮВАЛЬНОМУ КАНАЛІ ХОЛЛОВСЬКОГО ДВИГУНА (с. 6–13)

О. М. Петренко, В. О. Перерва

Об'єктом дослідження є магнітна система Холловського двигуна типу ST-40 та її модифікація з магнітним екрануванням прискорювального каналу. Проблема, що розв'язувалася у роботі, полягає у відсутності систематизованих кількісних даних щодо впливу способів магнітного екранування на топологію магнітного поля в каналі. Невизначеними залишаються пов'язані параметри, що впливають на ерозію стінок і стійкість режимів роботи двигуна.

У роботі виконано математичне моделювання топології магнітного поля для двигуна класичної схеми та двох варіантів магнітного екранування: із зовнішнім магнітним екраном і з використанням магнітом'якого полого анода. Отримано просторові розподіли радіальної складової індукції поля та визначено градієнти індукції вздовж осі прискорювального каналу. Показано, що для класичної схеми максимальний градієнт індукції становить близько 0,67 Т/м. Зовнішній магнітний екран підвищує його до 1,17 Т/м, а порожнистий анод – до 1,29 Т/м, тобто у 1,7–1,9 разів.

Отримані результати пояснюються зміною магнітного опору та перерозподілом магнітного потоку, що призводить до деформації силових ліній, їх орієнтації вздовж діелектричних стінок каналу та винесення максимуму індукції магнітного поля за зріз двигуна. Відмінною рисою дослідження є пряме кількісне порівняння топології магнітного поля для різних конструктивних схем на єдиній геометричній та струмовій базі, що дозволило об'єктивно оцінити ефективність кожного варіанта магнітного екранування.

Практичне використання отриманих результатів можливе при проектуванні та оптимізації магнітних систем Холловських двигунів середнього класу потужності за умов близьких до лабораторних і наземних випробувань. Їх застосування сприятиме зниженню ерозії, підвищенню стійкості розряду та збільшенню ресурсу.

Ключові слова: Холловський двигун, магнітне екранування, топологія магнітного поля, прискорювальний канал, моделювання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359146

ВИЗНАЧЕННЯ ДИСПЕРСІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ З ВУЗЬКИМИ ІМПЕДАНСНИМИ СТИНКАМИ (с. 14–24)

Л. М. Логачова, Т. І. Бугрова, М. П. Чорнобородов, С. В. Морщавка, Н. П. Чорнобородова

Об'єктом дослідження є прямокутний металевий хвилевід із вузькими імпедансними стінками, що описується еквівалентними граничними умовами імпедансного типу. Проблема, що розв'язувалася, полягала в розробці ефективної математичної моделі для аналізу хвилеводів із неідеально провідними та нерегулярними граничними поверхнями шляхом визначення їх дисперсійних характеристик і сталих поширення хвиль. Було запропоновано підхід на основі методу Фур'є та імпедансних граничних умов Леонтовича. Це дозволило оминати ускладнень, пов'язаних із векторною постановкою задачі і отримати трансцендентні рівняння для визначення сталих поширення об'ємних та поверхневих хвиль. Проведено аналітичний розв'язок дисперсійного рівняння та розраховано параметри власних хвиль у широкому діапазоні значень поверхневого імпедансу. Отримано аналітичні результати, які дозволили верифікувати правильність підходу з фізичної точки зору. Вони здатні полегшити оптимізацію параметрів базової структури під вимоги конкретного мікрохвильового пристрою. Це зумовлено використанням моделі імпедансних граничних умов, яка адекватно враховує вплив втрат і реактивних властивостей поверхні на електромагнітні поля та процеси поширення хвиль у хвилеводі. На практиці запропонований підхід можна застосувати для аналізу та проектування складних періодичних мікрохвильових структур, зокрема фільтрів, спрямованих відгалужувачів, елементів розподілу потужностей між випромінювачами фазованих антенних решіток. Завдяки узагальненню результатів дослідження у вигляді нормування імпедансних та спектральних характеристик базової хвилеводної структури отримані характеристики можна застосовувати для конструювання мікрохвильових пристроїв у діапазоні від дециметрових до міліметрових довжин хвиль.

Ключові слова: стала поширення, імпедансні граничні умови, поверхневі хвилі, поверхневий імпеданс, фільтри гармонік.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354290

РОЗРОБКА IPSO-TVAC ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕУТВОРЮЮЧИМИ ІНВЕРТОРАМИ В МЕРЕЖАХ З НИЗЬКИМ SCR З АПАРАТНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ (с. 25–35)

Pham Hong Thanh, Le Van Dai

Об'єктом дослідження є система керування інвертором, що формує мережу, на базі REGFM-B1, що працює в слабких мережах з коефіцієнтом короткого замикання (SCR) нижче 2,0. Робота зосереджена на оптимізації параметрів контролера віртуальної синхронної машини (VSM) з використанням покращеної оптимізації рою частинок зі змінними в часі коефіцієнтами прискорення (IPSO-TVAC). Основною проблемою, яку розглядають, є нездатність традиційних методів налаштування сходиться за трьох одночасних апаратних обмежень, включаючи насичення струму 1,2 од.о., затримку вимірювання 10 мс та шум квантування аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 0,01 в.о., які формують неопуклий ландшафт пошуку. Запропонована IPSO-TVAC порівнюється зі стандартними алгоритмами PSO (Std-PSO) та градієнтними алгоритмами, які часто сходяться до фізично нездійсненних рішень за заданих апаратних обмежень. Результати дослідження показують, що IPSO-TVAC значно перевершує стандартні підходи, при цьому інтеграл абсолютної похибки, зваженої за часом (ІТАЕ), зменшився на 16,1%, стандартне відхилення конвергенції стало нижче 1×10^{-4} , а пульсації активної потужності знизилися з 0,03 в.о. до нижче 0,005 в.о. Ці переваги свідчать про те, що IPSO-TVAC є високоефективним у стійких

перехідних процесах для всіх досліджуваних комбінацій обмежень. Основна перевага методу полягає в його дробовому порядку спаду інерції та функції витрат зі штрафами за похідну, що дозволяє одночасно керувати неопуклістю насичення струму та чутливістю до шуму АЦП протягом одного циклу оптимізації. Результати дослідження показують, що IPSO-TVAC особливо вигідний для акумуляторних накопичувачів комунального масштабу у віддалених мікромережах, острівних мережах та морських вітрових електростанціях, де стабільна стабільність частоти за умов обмежень перевантаження інвертора та шуму АЦП під час переходів мережі є критично важливою.

Ключові слова: інвертор, що формує мережу, REGFM-B1, IPSO-TVAC, слабкі мережі з низьким SCR, BESS, апаратні обмеження.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357609

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОБМІНУ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ З НАПІВНАСКРІЗНИМИ ЧУЖОРІДНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ (с. 36–43)

В. І. Гавриш, С. І. Яцишин, Л. І. Коляса, М. В. Степаняк, А. О. Капустянський

Об'єктом дослідження є процеси теплообміну в ізотропних просторових середовищах із чужорідними напівнаскрізними елементами, які піддаються зовнішнім та внутрішнім тепловим навантаженням.

Внаслідок теплового навантаження виникають значні температурні градієнти. Для встановлення та аналізу температурних режимів ефективної роботи електронних пристроїв розроблено математичні моделі визначення температурних полів.

На основі сформульованих крайових задач теплопровідності визначено їх аналітично-числові розв'язки. Із використанням цих розв'язків виконано числові розрахунки розподілу температури за просторовими координатами для заданих геометричних та теплофізичних параметрів.

Для ефективного опису коефіцієнта теплопровідності для неоднорідних просторових середовищ використано асиметричні одиничні функції. Запроваджено спосіб сегментно-сталого апроксимації температури як функції просторових координат на поверхнях чужорідних елементів. У результаті отримано диференціальні рівняння другого порядку з частковими похідними і розривними та сингулярними коефіцієнтами.

Отримані числові результати відображають розподіл температури в середовищах за просторовими координатами для заданих геометричних та теплофізичних параметрів. Кількість розпитів інтервалів $(0; h)$, $(-H; H)$, $(0; R)$ вибрано такою, що дорівнює 9. Це дало змогу отримати числові значення температури з точністю 10^{-6} . Розроблені математичні моделі теплообміну дають змогу аналізувати просторові ізотропні середовища з чужорідними наскрізними елементами щодо їх термостійкості. Використовуючи ці моделі, можна прогнозувати температурні режими в електронних пристроях, що створює передумови для підвищення їх надійності та довговічності.

Ключові слова: температурне поле, теплопровідність матеріалу, термостійкість конструкцій, теплообмін, напівнаскрізні чужорідні елементи.