

ABSTRACT AND REFERENCES

APPLIED PHYSICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342160

IMPLEMENTATION OF INTERLEAVED BI-DIRECTIONAL DC-DC CONVERTER WITH MULTI STAGE CONSTANT CURRENT CHARGING BASED ON FUZZY CONTROL FOR DISTURBANCE-RESISTANT ELECTRIC VEHICLE BATTERY SWAPPING STATIONS (p. 6–18)**Sonki Prasetya**Politeknik Negeri Jakarta, West Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1191-5287>**Eka Prasetyono**Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9109-8861>**Mochamad Ari Bagus Nugroho**Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8236-7509>**Epyk Sunarno**Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5827-2698>**Muhammad Fikri Rizki**Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8699-8129>**Haolia Rahman**Politeknik Negeri Jakarta, West Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3414-7225>**Muhammad Hidayat Tullah**Politeknik Negeri Jakarta, West Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1250-0710>**Jazuli Fadil**Politeknik Negeri Banjarmasin, Kalimantan Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1516-3207>**Teguh Suprianto**Politeknik Negeri Banjarmasin, Kalimantan Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2267-2460>**Lauhil Mahfudz Hayusman**Politeknik Negeri Banjarmasin, Kalimantan Selatan, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-0502>

This research presents an interleaved bi-directional non-inverting buck-boost converter designed for public electric vehicle battery swapping stations (BSS). This study solves the critical problem of BSS vulnerability to main power outages, which threatens their operational reliability. The developed solution is a device that not only performs efficient charging but also functions as an emergency power source, utilizing power from connected batteries during a grid failure. The methodology incorporates an interleaved topology and a multi-stage constant current (MSCC) charging method controlled by a fuzzy logic controller (FLC). Experimental results show the interleaved operation successfully increased power capacity up to 1.1 kW, achieving an average efficiency of 93.44%. A distinctive feature of the result is the reduction of the output current ripple by 47.7% down to 0.92%. This is explained by the ripple-cancellation effect inherent to the interleaved design, which is a key feature for preserving long-term battery health. Furthermore, the MSCC method achieved a 13.7% reduction in execution time compared to the conventional constant current-constant voltage (CC-CV) method, with a total charging du-

ration of 66.8 minutes. This validated prototype successfully demonstrated a seamless and automatic emergency mode transition during a power failure, directly answering the BSS reliability challenge. The prototype also confirmed its bidirectional functionality and seamless mode transition from standard charging to emergency power supply mode. The scope of this research provides a practical and high-performance integrated solution for BSS, effectively addressing vulnerability issues by improving reliability and charging time efficiency, ensuring continuous service.

Keywords: battery swapping station, multi stage constant current, interleaved bidirectional converter.

References

1. Asy'ari, M. K., Panggabean, D. K. S. H., Musyafa, A., Ginting, K. B. (2025). Development of a lithium-ion battery charging system under constant current and voltage conditions using STM-32 based on fuzzy logic control. *Indonesian Physical Review*, 8 (1), 340–348. <https://doi.org/10.29303/ipr.v8i1.409>
2. Yousuf, A. K. M., Wang, Z., Paranjape, R., Tang, Y. (2023). Electric Vehicle Charging Station Infrastructure: A Comprehensive Review of Technologies, Challenges, and Mitigation Strategies. 2023 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 588–592. <https://doi.org/10.1109/ccece58730.2023.10289005>
3. Siddiqua, A., Cherala, V., Yemula, P. K. (2023). Optimal Sizing and Adaptive Charging Strategy for the Battery Swapping Station. 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 1–6. <https://doi.org/10.1109/appeec57400.2023.10561997>
4. Afshar, S., Macedo, P., Mohamed, F., Disfani, V. (2020). A Literature Review on Mobile Charging Station Technology for Electric Vehicles. 2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 1184–1190. <https://doi.org/10.1109/itec48692.2020.9161499>
5. Reddy, N. A., Shreyash, K. S., Adithya, N. V., Namitha, D., Kalyan, C. P. (2023). Integration and Implementation of Renewable Energy based Charging Station. 2023 First International Conference on Cyber Physical Systems, Power Electronics and Electric Vehicles (ICPEEV), 1–5. <https://doi.org/10.1109/icpeev58650.2023.10391903>
6. Teske, P., Gentejohann, M., Wiemann, D., Krüger, L., Kowal, J., Dieckerhoff, S. (2024). Open Battery Platform: Open-Source Power Electronic Devices for Renewable Generation and Energy Storage Technology. 2024 IEEE 15th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 1–6. <https://doi.org/10.1109/pedg61800.2024.10667440>
7. Kumar, R., Verma, M., Kulkarni, A. (2024). Optimizing Bidirectional EV Charger with Rapid Charging Architecture using Fuzzy Logic Control. 2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON), 1–6. <https://doi.org/10.1109/inocon60754.2024.10511811>
8. Sharma, A., Veerachary, M. (2018). A DC-DC Bidirectional Converter with Improved Mode Transition Technique. 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 1–6. <https://doi.org/10.1109/pedes.2018.8707722>
9. Schaltz, E., Rasmussen, P. O., Khaligh, A. (2008). Non-inverting buck-boost converter for fuel cell applications. 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. <https://doi.org/10.1109/iecon.2008.4758065>
10. Rao, A. V., Guruswamy, K. P. (2021). Analysis, Design and Simulation of Non-Inverting Buck-Boost DC-DC Converter for Battery Charging. 2021 International Conference on Disruptive Technologies for Multi-Disciplinary Research and Applications (CENTCON), 79–84. <https://doi.org/10.1109/centcon52345.2021.9688165>

11. Polat, H., Hosseinabadi, F., Hasan, Md. M., Chakraborty, S., Geury, T., El Baghdadi, M. et al. (2023). A Review of DC Fast Chargers with BESS for Electric Vehicles: Topology, Battery, Reliability Oriented Control and Cooling Perspectives. *Batteries*, 9 (2), 121. <https://doi.org/10.3390/batteries9020121>
12. Abdel-Rahim, O., Chub, A., Blinov, A., Vinnikov, D., Pefitsis, D. (2022). An Efficient Non-Inverting Buck-Boost Converter with Improved Step Up/Down Ability. *Energies*, 15 (13), 4550. <https://doi.org/10.3390/en15134550>
13. Nguyen, V.-S., Tran, V.-L., Choi, W., Kim, D.-W. (2014). Analysis of the Output Ripple of the DC-DC Boost Charger for Li-Ion Batteries. *Journal of Power Electronics*, 14 (1), 135–142. <https://doi.org/10.6113/jpe.2014.14.1.135>
14. Alharbi, M. A., Alcaide, A. M., Dahidah, M., P., M.-R., Ethni, S., Pickert, V., Leon, J. I. (2023). Rotating Phase Shedding for Interleaved DC-DC Converter-Based EVs Fast DC Chargers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38 (2), 1901–1909. <https://doi.org/10.1109/tpe.2022.3211864>
15. Zhang, C., Xu, B., Jasni, J., Radzi, M. A. M., Azis, N., Zhang, Q. (2022). Model Control and Digital Implementation of the Three Phase Interleaved Parallel Bidirectional Buck-Boost Converter for New Energy Electric Vehicles. *Energies*, 15 (19), 7178. <https://doi.org/10.3390/en15197178>
16. Pirashanthiyah, L., Edirisinghe, H. N., De Silva, W. M. P., Bolonne, S. R. A., Logeeshan, V., Wanigasekara, C. (2024). Design and Analysis of a Three-Phase Interleaved DC-DC Boost Converter with an Energy Storage System for a PV System. *Energies*, 17 (1), 250. <https://doi.org/10.3390/en17010250>
17. Suryoatmojo, H., Pratama, I. A., Soedibyo, S. (2021). Non-Inverting Cascaded Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter with Average Current Mode Control for Lithium-Ion Battery Charger. *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, 5 (2). <https://doi.org/10.12962/jaree.v5i2.167>
18. Alajmi, B. N., Marei, M. I., Abdelsalam, I., Ahmed, N. A. (2022). Multiphase Interleaved Converter Based on Cascaded Non-Inverting Buck-Boost Converter. *IEEE Access*, 10, 42497–42506. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3168389>
19. Sunarno, E., Suharningsih, Prasetyono, E., Nugroho, M. A. B., Eviningsih, R. P., Nizar, R. F. (2024). Interleaved Buck Converter as Current Regulator for Lithium Ion Battery Charging with Fuzzy Logic Control. 2024 International Electronics Symposium (IES), 13–18. <https://doi.org/10.1109/ies63037.2024.10665860>
20. Batteries in a Portable World (2017). Isidor Buchmann. Available at: <https://batteryuniversity.com/buy-the-book>.
21. Nugroho, M. A. B., Alifi, A. D., Suharningsih, S., Sunarno, E., Prasetyono, E., Anggriawan, D. O. (2024). Multi-step constant current-constant voltage charging method to improve CC-CV method on lead acid batteries. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 22 (6), 1564. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v22i6.25968>
22. Imran, R. M., Li, Q., Flaih, F. M. F. (2020). An Enhanced Lithium-Ion Battery Model for Estimating the State of Charge and Degraded Capacity Using an Optimized Extended Kalman Filter. *IEEE Access*, 8, 208322–208336. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3038477>
23. Khan, A. B., Pham, V.-L., Nguyen, T.-T., Choi, W. (2016). Multistage constant-current charging method for Li-Ion batteries. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 381–385. <https://doi.org/10.1109/itec-ap.2016.7512982>
24. Khan, A. B., Choi, W. (2018). Optimal Charge Pattern for the High-Performance Multistage Constant Current Charge Method for the Li-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33 (3), 1132–1140. <https://doi.org/10.1109/tec.2018.2801381>
25. Balamurugan, P., Agarwal, P., Khajuria, D., Mahapatra, D., Angalaeswari, S., Natrayan, L., Mammo, W. D. (2023). State-Flow Control Based Multistage Constant-Current Battery Charger for Electric Two-Wheeler. *Journal of Advanced Transportation*, 2023, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2023/4554582>
26. Yurkovich, S., Passino, K. M. (1999). A laboratory course on fuzzy control. *IEEE Transactions on Education*, 42 (1), 15–21. <https://doi.org/10.1109/13.746327>
27. Shekhar, Y., Verma, S., Singh, N., Mishra, P., Ahmad, A. U., Bharati, K. K. (2024). Smart Control Strategies in Photovoltaic Systems: A Critical Review on Fuzzy Logic MPPT And PI Control For Charge Management. 2024 3rd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and Its Control (PARC), 238–243. <https://doi.org/10.1109/parc59193.2024.10486316>
28. Falih, A. Z., Efendi, M. Z., Murdianto, F. D. (2021). CC-CV Controlled Fast Charging Using Fuzzy Type-2 for Battery Lithium-Ion. *JAREE (Journal on Advanced Research in Electrical Engineering)*, 5 (2). <https://doi.org/10.12962/jaree.v5i2.200>
29. Faisal, M., Hannan, M. A., Ker, P. J., Hossain Lipu, M. S., Uddin, M. N. (2021). Fuzzy-Based Charging–Discharging Controller for Lithium-Ion Battery in Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57 (4), 4187–4195. <https://doi.org/10.1109/tia.2021.3072875>
30. Wiryajati, I. K., Satiawan, I. N. W., Suksmadana, I. M. B., Wiwaha, B. B. P. (2025). Investigation and Analysis of Fuzzy Logic Controller Method on DC-DC Buck-Boost Converter. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11 (1), 1066–1074. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i1.9744>
31. Recommended External Circuitry for Transphorm GaN FETs (2018). Transphorm. Available at: https://www.mouser.com/pdfDocs/recommended-external-circuitry-transphorm-gan-fets-20190711-5.pdf?srsltid=AfmBOoQZ34XYpr2Q3s6cxq0_AcoadEeWW0I0yk4Zd-jwhWCp1gheDbzZu
32. STM32G441xB. Datasheet (2021). STMicroelectronics. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g441cb.pdf>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342301

DETECTING INSULATION DEFECTS IN ELECTRICAL MACHINES' MULTI-TURN WINDINGS BASED ON ANALYSIS OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROCESSES (p. 19–30)

Vadim Chumack

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>**Mykhailo Kovalenko**

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>**Oksana Tymoshchuk**

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-3095>**Roman Dukhno**

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9506-2234>

This study investigates transient processes occurring in a squirrel-cage induction motor with a stator's multi-turn winding. These processes are used to devise efficient and simple diagnostic methods for assessing the condition of the least reliable element in an electrical machine – the winding insulation. This paper solves the task related to enhancing the operational reliability of electrical machines with multi-turn windings.

The proposed high-frequency model of transient processes in multi-turn windings of electrical machines aims to non-destructively diagnose the insulation. This model enables analysis of high-frequency

and impulse phenomena with an equivalent frequency of up to tens of MHz, which may arise during the operation of the machine because of switching and atmospheric overvoltage, as well as when powering electric motors with inverters. Underlying the model is the frequency and time domain analyses under above-mentioned influences using a low-power multi-turn induction motor as an example.

To construct the model, a multi-segment equivalent circuit was used, represented as a series of connected four-poles with inductive-resistive-capacitive parameters corresponding to sections of the winding phase with conditionally uniform concentrated parameters.

The constructed model and the proposed method make it possible to achieve the necessary test overvoltage to detect hidden and undeveloped defects at minimal sparing energy impact, without causing its irreversible destruction. Taking into account the distributed parameters of the winding sections combined with the impulse nature of the excitation ensure non-destructive testing (or non-destructive evaluation) of multi-turn-wound AC machine windings compared to classical testing methods.

The proposed method makes it possible to obtain 2–2.5 times higher longitudinal test gradients with a comparable energetic impact at the level of 0.1 J. The results will contribute to improving the reliability of electrical machine operation in industrial settings by integrating the devised method into the system of planned preventive maintenance of electrical equipment.

Keywords: high-frequency model, equivalent circuit, wave processes, diagnostics of winding insulation.

References

1. Asgari, A., Hanisch, L. V., Anspach, J., Franzki, J., Kahn, M., Kurat, M., Henke, M. (2024). Reliability of Insulation Systems and Its Impact on Electric Machine Design for Automotive and Aviation Applications. *Energies*, 18 (1), 92. <https://doi.org/10.3390/en18010092>
2. Zhang, J., Wang, J., Li, H., Zhang, Q., He, X., Meng, C. et al. (2025). A Review of Reliability Assessment and Lifetime Prediction Methods for Electrical Machine Insulation Under Thermal Aging. *Energies*, 18 (3), 576. <https://doi.org/10.3390/en18030576>
3. Saeed, M., Fernández, D., Guerrero, J. M., Díaz, I., Briz, F. (2024). Insulation Condition Assessment in Inverter-Fed Motors Using the High-Frequency Common Mode Current: A Case Study. *Energies*, 17 (2), 470. <https://doi.org/10.3390/en17020470>
4. Ghassemi, M. (2019). Accelerated insulation aging due to fast, repetitive voltages: A review identifying challenges and future research needs. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26 (5), 1558–1568. <https://doi.org/10.1109/tdei.2019.008176>
5. Hassan, W., Hussain, G. A., Wahid, A., Safdar, M., Khalid, H. M., Jamil, M. K. M. (2024). Optimum feature selection for classification of PD signals produced by multiple insulation defects in electric motors. *Scientific Reports*, 14 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73196-z>
6. Li, Z., Qian, Y., Wang, H., Zhou, X., Sheng, G., Jiang, X. (2021). A novel image-orientation feature extraction method for partial discharges. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16 (6), 1139–1150. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12356>
7. Ji, Y., Giangrande, P., Madonna, V., Zhao, W., Galea, M. (2021). Reliability-Oriented Design of Inverter-Fed Low-Voltage Electrical Machines: Potential Solutions. *Energies*, 14 (14), 4144. <https://doi.org/10.3390/en14144144>
8. Wang, J., Kong, Y., Cai, Y., Wang, Y. (2024). Effect of the repetition frequency and polarity of square wave voltage on the partial discharge of electric machine insulation for more electrical aircraft. *Journal of Physics: Conference Series*, 2820 (1), 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2820/1/012110>
9. Sun, H., Wang, Y., Lu, F., Ding, Y., Xinyang, Z., Yin, Y. (2023). Research on Partial Discharge of More Electric Aircraft Propulsion Motor Insulation Under Low Pressure and Square Wave Voltage. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221785>
10. Jiang, J., Li, Z., Li, W., Ranjan, P., Wei, X., Zhang, X., Zhang, C. (2023). A review on insulation challenges towards electrification of aircraft. *High Voltage*, 8 (2), 209–230. <https://doi.org/10.1049/hve2.12304>
11. Ji, Y., Giangrande, P., Zhao, W. (2024). Effect of Environmental and Operating Conditions on Partial Discharge Activity in Electrical Machine Insulation: A Comprehensive Review. *Energies*, 17 (16), 3980. <https://doi.org/10.3390/en17163980>
12. Zhou, X., Giangrande, P., Ji, Y., Zhao, W., Ijaz, S., Galea, M. (2024). Insulation for Rotating Low-Voltage Electrical Machines: Degradation, Lifetime Modeling, and Accelerated Aging Tests. *Energies*, 17 (9), 1987. <https://doi.org/10.3390/en17091987>
13. Chumack, V., Kovalenko, M., Tymoshchuk, O., Stulishenko, A., Ihnatiuk, Y. (2023). Design of a multilink system for calculating high-frequency processes in electric machines with mesh windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (123)), 54–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.282375>
14. Kovalenko, M., Chumack, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Bazenov, V., Ihnatiuk, Y., Stulishenko, A. (2023). Research of high-frequency remagnetization model in laminated magnetic cores of electromechanical and electromagnetic energy converters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (5 (124)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286002>
15. Chumak, V., Dukhno, R., Stulishenko, A., Svyatnenko, V. (2024). High-Frequency Processes In The Windings Of General-Purpose Electrical Machines In The Presence Of Defects In The Ground-Wall Insulation. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 2 (125), 130–141. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-15>
16. Kaganov, Z. G. (1990). *Elektricheskie tsepi s raspredelennymi parametrami i cepnye skhemy*. Moscow: Energoatomizdat, 248.
17. Mahdavi, S., Hameyer, K. (2012). High frequency equivalent circuit model of the stator winding in electrical machines. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 1706–1711. <https://doi.org/10.1109/icelmach.2012.6350110>
18. Heller, B., Veverka, A. (1960). *Vlnové procesy v elektrických strojích*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 392.
19. Boglietti, A., Carpaneto, E. (1999). Induction motor high frequency model. Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370), 3, 1551–1558. <https://doi.org/10.1109/ias.1999.805947>
20. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., Falchenko, M. (2022). Voltage Control of the Magnetolectric Generator Based on the Change of the Magnetic Resistance of the Auxiliary Flux Circuits. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 169–174. <https://doi.org/10.1109/ess57819.2022.9969289>
21. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., Ihnatiuk, Y. (2022). Magnetolectric Generator with Magnetic Flux Shunting for Electric Power Complexes. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 160–164. <https://doi.org/10.1109/ess57819.2022.9969246>
22. Kovalenko, M. A., Kovalenko, I. Y., Tkachuk, I. V., Harford, A. G., Tsyplenkov, D. V. (2024). Mathematical modeling of a magnetic gear for an autonomous wind turbine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 88–95. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-2/088>

DOI: 10.15587/2706-5448.2025.341525

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF HEAT EXCHANGE FOR DIGITAL DEVICES WITH LOCAL NEAR-SURFACE AND INTERNAL HEATING (p. 31–40)

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>

Viktoria Maikher

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0786-6950>

Oksana Hrytsai

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0710-1675>

Fedir Honchar

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6914-400X>

This study investigates heat exchange processes for thermally sensitive media with local near-surface and internal heating. As a result of the thermal load, significant temperature gradients arise. To establish temperature regimes for effective operation of electronic devices, linear and nonlinear mathematical models for determining the temperature field have been constructed, which could allow further analysis of temperature regimes.

Based on the stated linear and nonlinear boundary value problems of thermal conductivity, their analytical and numerical solutions have been derived. Using these solutions, numerical calculations of the temperature distribution in spatial coordinates for given geometric and thermophysical parameters have been performed. Reliability of the results has been confirmed by experimental findings and the determined numerical values of temperature distribution in the medium.

For an effective description of local heating, the theory of generalized functions was used. A technique for linearizing nonlinear mathematical models has been introduced. As a result, linear second-order differential equations with partial derivatives and a singular right-hand side have been derived.

The numerical results reflect the temperature distribution in the medium in spatial coordinates for the given geometric and thermophysical parameters. The number of divisions of the interval $(0; x^*)$ was chosen to be 9, which made it possible to derive numerical values of temperature with an accuracy of 10^{-6} . The obtained numerical values of temperature for silicon under a linear temperature dependence of the thermal conductivity coefficient differ from the results obtained for its constant value by 2%.

Keywords: temperature field, thermal conductivity of material, thermal stability of structures, heat-sensitive material, thermally-active zone.

References

- Cui, Y., Li, M., Hu, Y. (2020). Emerging interface materials for electronics thermal management: experiments, modeling, and new opportunities. *Journal of Materials Chemistry C*, 8 (31), 10568–10586. <https://doi.org/10.1039/c9tc05415d>
- Pannuchoenwong, N., Rattanadecho, P., Echaroj, S., Hemathulin, S., Nabudda, K. (2020). The Investigation of Heat Absorber on the Efficiency of Slanted Double-Slope Solar Distillation Unit. *International Journal of Heat and Technology*, 38 (1), 171–179. <https://doi.org/10.18280/ijht.380119>
- Zhang, Z., Sun, Y., Cao, X., Xu, J., Yao, L. (2024). A slice model for thermoelastic analysis of porous functionally graded material sandwich beams with temperature-dependent material properties. *Thin-Walled Structures*, 198, 111700. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111700>
- Zhang, Z., Zhou, D., Fang, H., Zhang, J., Li, X. (2021). Analysis of layered rectangular plates under thermo-mechanical loads considering temperature-dependent material properties. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.036>
- Filymonenko, N. M., Filimonenko, K. V. (2020). Analysis of capability for improvement of basic mathematical model of electrode of ferro-alloy furnace. *Scientific journals of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 7 (263), 53–57. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-263-7-53-57>
- Sadiq Al-Baghdadi, M. A. R., Noor, Z. M. H., Zeiny, A., Burns, A., Wen, D. (2020). CFD analysis of a nanofluid-based microchannel heat sink. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100685. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100685>
- Liu, J., Zhang, Y., Zhang, D., Jiao, S., Zhang, Z., Zhou, Z. (2020). Model development and performance evaluation of thermoelectric generator with radiative cooling heat sink. *Energy Conversion and Management*, 216, 112923. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112923>
- Hu, S., Li, C., Zhou, Z., Liu, B., Zhang, Y., Yang, M. et al. (2023). Nanoparticle-enhanced coolants in machining: mechanism, application, and prospects. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18 (4). <https://doi.org/10.1007/s11465-023-0769-8>
- Peng, X., Li, X., Gong, Z., Zhao, X., Yao, W. (2022). A deep learning method based on partition modeling for reconstructing temperature field. *International Journal of Thermal Sciences*, 182, 107802. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107802>
- Ren, Y., Huo, R., Zhou, D., Zhang, Z. (2022). Thermo-Mechanical Buckling Analysis of Restrained Columns Under Longitudinal Steady-State Heat Conduction. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47 (3), 1411–1423. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-01020-7>
- Zhou, Y., Wu, S., Long, Y., Zhu, P., Wu, F., Liu, F., Murugadoss, V. et al. (2020). Recent Advances in Thermal Interface Materials. *ES Materials & Manufacturing*, 7, 4–24. <https://doi.org/10.30919/esmm5f717>
- Chu, Y.-M., Shah, F., Khan, M. I., Kadry, S., Abdelmalek, Z., Khan, W. A. (2020). Cattaneo-Christov double diffusions (CCDD) in entropy optimized magnetized second grade nanofluid with variable thermal conductivity and mass diffusivity. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (6), 13977–13987. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.101>
- Sebald, G., Komiya, A., Jay, J., Coativy, G., Lebrun, L. (2020). Regenerative cooling using elastocaloric rubber: Analytical model and experiments. *Journal of Applied Physics*, 127 (9). <https://doi.org/10.1063/1.5132361>
- Liu, H., Yu, J., Wang, R. (2023). Dynamic compact thermal models for skin temperature prediction of portable electronic devices based on convolution and fitting methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 210, 124170. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124170>
- Ghannad, M., Yaghoobi, M. P. (2015). A thermoelasticity solution for thick cylinders subjected to thermo-mechanical loads under various boundary conditions. *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*, 8 (4). Available at: <https://sanad.iau.ir/journal/admt/Article/534941?jid=534941>
- Havrysh, V. I. (2015). Nonlinear Boundary-Value Problem of Heat Conduction for a Layered Plate with Inclusion. *Materials Science*, 51 (3), 331–339. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9846-4>
- Havrysh, V. I. (2017). Investigation of Temperature Fields in a Heat-Sensitive Layer with Through Inclusion. *Materials Science*, 52 (4), 514–521. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-9984-y>
- Havrysh, V. I., Kosach, A. I. (2012). Boundary-value problem of heat conduction for a piecewise homogeneous layer with foreign inclusion. *Materials Science*, 47(6), 773–782. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9455-4>
- Gavrysh, V., Tushnytskyy, R., Pelekh, Y., Pukach, P., Baranetskyi, Y. (2017). Mathematical model of thermal conductivity for piecewise homogeneous elements of electronic systems. 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 333–336. <https://doi.org/10.1109/cadsm.2017.7916146>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342161

DETERMINING THE POSSIBILITY OF HIGH-PRECISION DEFORMATION MEASUREMENT IN BUILDING STRUCTURES USING FIBER-OPTIC METHODS (p. 41–49)**Nurzhigit Smailov**

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after
Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Amandyk Tuleshov

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after
Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

Akezhan Sabibolda

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after
Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan
Almaty Academy of Ministry of Internal Affairs,
Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

Yersaiyn Mailybayev

International University of Transportation
and Humanities, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1977-3690>

Nurzhamal Kashkimbayeva

Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6070-876X>

Ainur Kuttybayeva

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7281-3690>

Gulbakhar Yussupova

ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9765-2221>

Askhat Batyrgaliyev

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1103-8659>

Beibarys Sekenov

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after
Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8161-7900>

Aziskhan Amir

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering named after
Academician U. A. Dzholdasbekov, Almaty, Republic of Kazakhstan
Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4001-3745>

The object of this study is the deformation process in reinforced-concrete structural elements equipped with embedded fiber-optic sensors. The problem addressed corresponds to unresolved issues identified in previous studies – namely, the lack of standardized quantitative evaluation of accuracy and stability in fiber-optic deformation measurement. Despite high laboratory precision, existing methods show reduced long-term reliability, temperature-strain cross-sensitivity, and calibration inconsistency when applied to real structures.

The main results show that fiber Bragg grating (FBG) and interferometric sensors achieved sub-micrometer deformation resolution with deviations below 2–3 μm and long-term drift under 0.5%. Measurements remained stable under variable loading and temperature, confirming high reproducibility and electromagnetic immunity. These findings validate the hypothesis that optical wavelength shifts

directly correspond to mechanical strain, ensuring reliable strain detection without recalibration.

This effectiveness stems from the intrinsic photoelastic coupling and refractive-index sensitivity of the optical fiber, which provide nanometric resolution, corrosion resistance, and long-term operational stability. The proposed method is applicable for long-term monitoring of bridges, tunnels, and high-rise facilities exposed to environmental and cyclic stresses. Therefore, research on high-precision fiber-optic deformation measurement remains scientifically relevant for improving the safety and durability of modern civil engineering structures.

Keywords: fiber-optic sensor, deformation measurement, construction structure, Bragg grating, structural monitoring.

References

- Wu, T., Liu, G., Fu, S., Xing, F. (2020). Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure. *Sensors*, 20 (16), 4517. <https://doi.org/10.3390/s20164517>
- Lopez-Higuera, J. M., Rodriguez Cobo, L., Quintela Incera, A., Cobo, A. (2011). Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring. *Journal of Lightwave Technology*, 29 (4), 587–608. <https://doi.org/10.1109/jlt.2011.2106479>
- Barrias, A., Casas, J., Villalba, S. (2016). A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors*, 16 (5), 748. <https://doi.org/10.3390/s16050748>
- Ye, X. W., Su, Y. H., Han, J. P. (2014). Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/652329>
- Guo, H., Xiao, G., Mrad, N., Yao, J. (2011). Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms. *Sensors*, 11 (4), 3687–3705. <https://doi.org/10.3390/s110403687>
- Bao, X., Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, 12 (7), 8601–8639. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
- Motil, A., Bergman, A., Tur, M. (2016). [INVITED] State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing. *Optics & Laser Technology*, 78, 81–103. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013>
- Bado, M. F., Casas, J. R. (2021). A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. *Sensors*, 21 (5), 1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>
- Guemes, A., Mujica, L. E., del-Rio-Velilla, D., Fernandez-Lopez, A. (2025). Structural Health Monitoring by Fiber Optic Sensors. *Photonics*, 12 (6), 604. <https://doi.org/10.3390/photonics12060604>
- Smailov, N., Tolemanova, A., Aziskhan, A., Sekenov, B., Sabibolda, A. (2025). Zastosowanie systemów czujników światłowodowych w monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji betonowych. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 15 (3), 73–76. <https://doi.org/10.35784/iapgos.7606>
- Wawrzyk, M. (2022). The spectrum length method in quantitative interpretation of selected optical spectra. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 12 (2), 20–23. <https://doi.org/10.35784/iapgos.2931>
- Smailov, N., Koshkinbayev, S., Tashtay, Y., Kuttybayeva, A., Abdykadyrkzy, R., Arseniev, D. et al. (2023). Numerical Simulation and Measurement of Deformation Wave Parameters by Sensors of Various Types. *Sensors*, 23 (22), 9215. <https://doi.org/10.3390/s23229215>
- Jati, M. P., Yao, C.-K., Wu, Y.-C., Luthfi, M. I., Yang, S.-H., Dehnav, A. M., Peng, P.-C. (2025). A Deep Learning Framework for Enhancing High-Frequency Optical Fiber Vibration Sensing from Low-Sampling-Rate FBG Interrogators. *Sensors*, 25 (13), 4047. <https://doi.org/10.3390/s25134047>
- Sabibolda, A., Tsyporenko, V., Smailov, N., Tsyporenko, V., Abdykadyrov, A. (2024). Estimation of the Time Efficiency of a Radio Direction

- Finder Operating on the Basis of a Searchless Spectral Method of Dispersion-Correlation Radio Direction Finding. *Advances in Asian Mechanism and Machine Science*, 167, 62–70. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67569-0_8
15. Chen, X., Liu, M., Li, C., Song, H., Zhu, S. (2024). A novel integrated sensing structure based on double quartz tubes stepped fiber grating and its theoretical study on temperature sensing performance. *Optics and Lasers in Engineering*, 181, 108382. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108382>
 16. Smailov, N., Orynbet, M., Nazarova, A., Torekhan, Z., Koshkinbayev, S., Yssyraiyl, K. et al. (2025). Optymalizacja pracy światłowodowych czujników w warunkach kosmicznych. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 15 (2), 130–134. <https://doi.org/10.35784/iapgos.7200>
 17. Macedo, L., Souza, E. A., Frizera, A., Pontes, M. J., Marques, C., Leal-Junior, A. (2023). Static and Dynamic Multiparameter Assessment of Structural Elements Using Chirped Fiber Bragg Gratings. *Sensors*, 23 (4), 1860. <https://doi.org/10.3390/s23041860>
 18. Smailov, N., Zhadiger, T., Tashtay, Y., Abdykadyrov, A., Amir, A. (2024). Fiber laser-based two-wavelength sensors for detecting temperature and strain on concrete structures. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 7 (4), 1693–1710. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v7i4.3481>
 19. Huang, L., Zhao, Z., Sun, Y. (2024). Damage Monitoring of Reinforced Concrete Slabs Utilizing Distributed Fiber Sensing Technology. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4946103>
 20. Smailov, N., Akmaridin, S., Ayapbergenova, A., Ayapbergenova, G., Kadyrova, R., Sabibolda, A. (2025). Analiza wydajności VLC w optycznych systemach komunikacji bezprzewodowej do zastosowań wewnętrznych. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 15 (2), 135–138. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6971>
 21. Alj, I., Quiertant, M., Khadour, A., Grando, Q., Benzarti, K. (2022). Application of Distributed Optical Fiber Sensing Technology to the Detection and Monitoring of Internal Swelling Pathologies in Massive Concrete Blocks. *Sensors*, 22 (20), 7797. <https://doi.org/10.3390/s22207797>
 22. Smailov, N., Tsymporenko, V., Sabibolda, A., Tsymporenko, V., Abdykadyrov, A., Kabdoldina, A. et al. (2024). Streamlining digital correlation-interferometric direction finding with spatial analytical signal. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14 (3), 43–48. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6177>
 23. Chethana, K., Nandi, S., Prasad, A. S. G., Asokan, S. (2025). Fiber Bragg Grating based optical sensor for pulse morphology. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-025-02895-1>
 24. Abdykadyrov, A., Smailov, N., Sabibolda, A., Tolen, G., Dosbayev, Z., Ualiyev, Z., Kadyrova, R. (2024). Optimization of distributed acoustic sensors based on fiber optic technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (131)), 50–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313455>
 25. Xue, W., Huang, H., Pang, X., Yan, G. (2025). Fiber Bragg Grating Based Load Monitoring for Carrier-Based Aircraft Main Landing Gear. *Sensors*, 25 (17), 5559. <https://doi.org/10.3390/s25175559>
 26. Yassin, M. H., Farhat, M. H., Nahas, M., Saad, A. S. (2024). Investigation of fiber Bragg grating sensor measurability in concrete beams under static load conditions. *Heliyon*, 10 (22), e40105. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40105>
 27. Yang, H., Huang, Y., Zhou, Z., Ou, J. (2022). Long-term performance of packaged fiber Bragg grating sensors for strain monitoring inside creep medium. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 13 (1), 42–63. <https://doi.org/10.1080/19475411.2022.2027548>
 28. Zdanowicz, K., Gebauer, D., Koschemann, M., Speck, K., Steinbock, O., Beckmann, B., Marx, S. (2022). Distributed fiber optic sensors for measuring strains of concrete, steel, and textile reinforcement: Possible fields of application. *Structural Concrete*, 23 (6), 3367–3382. <https://doi.org/10.1002/suco.202100689>
 29. Sahota, J. K., Gupta, N., Dhawan, D. (2020). Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review. *Optical Engineering*, 59 (06), 1. <https://doi.org/10.1117/1.oe.59.6.060901>
 30. Smailov, N., Tolemanova, A., Ayapbergenova, A., Tashtay, Y., Amir, A. (2025). Modelling and Application of Fibre Optic Sensors for Concrete Structures: A Literature Review. *Civil Engineering and Architecture*, 13 (3), 1885–1897. <https://doi.org/10.13189/cea.2025.130332>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342477

CONSTRUCTION OF AN ELECTRON-OPTICAL SCHEME FOR ELECTROSTATIC QUASI-SPHERICAL DEFLECTOR-TYPE ENERGY ANALYZER (p. 50–59)

Zhanar Kambarova

Karaganda Buketov University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9808-5484>

Serik Kassymov

Karaganda Buketov University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4979-9127>

This study investigates electrostatic spherical deflector-type energy analyzers designed to analyze energy of charged particle beams. The research aims to eliminate quadratic angular aberrations characteristic of classical spherical deflector-type energy analyzers, which limit the quality of angular focusing and the energy resolution of the instruments. An electron-optical scheme of an electrostatic quasi-spherical deflector-type energy analyzer has been proposed, whose field is synthesized using a multipole approach.

The electrostatic field of the energy analyzer is a superposition of an axisymmetric hexapole and a spherical field. Analytical calculations have shown that by choosing the coefficient that determines the weighting contribution of the axisymmetric hexapole, it is possible to completely compensate for second-order angular aberrations and significantly improve the focusing properties of the quasi-spherical energy analyzer.

The profile of the deflecting electrodes of the energy analyzer has been determined, providing the necessary spatial distribution of the deflecting field potential to achieve the specified electron-optical parameters. Numerical simulation of the electron-optical scheme of the quasi-spherical energy analyzer and calculation of the trajectories of charged particles were carried out using the "Focus" numerical program. The electron-optical scheme of the energy analyzer implements a second-order angular focusing mode of the "axis-ring" type.

The instrumental function of the scheme has been constructed. The relative energy resolution and luminosity of the energy analyzer were estimated. The numerical results show that the relative energy resolution of the energy analyzer is 1.6% at a luminosity of 17.5% of 2π , which confirms effectiveness of the proposed scheme. The proposed electron-optical scheme could be used to design real structures of new high-resolution spectrometers intended for the analysis of charged particle beams.

Keywords: multipole approach, electrostatic deflector-type energy analyzer, quasi-spherical field, axisymmetric multipole, angular aberrations.

References

1. Cara, A., Lavraud, B., Fedorov, A., De Keyser, J., DeMarco, R., Marcucci, M. F. et al. (2017). Electrostatic analyzer design for solar wind proton measurements with high temporal, energy, and angular resolutions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122 (2), 1439–1450. <https://doi.org/10.1002/2016ja023269>

2. Hirahara, M., Takei, T., Yokota, S., Yanagimachi, T. (2023). Triple-Dome Electrostatic Energy Analyzer With 360° Field-Of-View for Simultaneous Measurements of Ions and Electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128 (10). <https://doi.org/10.1029/2023ja031423>
3. Hénaff, G., Berthomier, M. (2025). Parametric Study of the Performance of an Electrostatic Analyzer With an Hemispheric Field-of-View Based on the Donut Topology. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 130 (3). <https://doi.org/10.1029/2024ja033367>
4. Sablik, M. J., Winningham, J. D., Gurgiolo, C., Johnstone, A. D. (1985). Computer simulation of an electrostatic spherical analyzer used as an energy spectrograph. *Review of Scientific Instruments*, 56 (7), 1320–1328. <https://doi.org/10.1063/1.1137998>
5. Kisker, E., Campagna, M., Gudat, W., Kuhlmann, E. (1979). Properties and operation of a 90° spherical deflector as photoelectron energy analyzer in connection with spin-polarization measurements by Mott scattering. *Review of Scientific Instruments*, 50 (12), 1598–1601. <https://doi.org/10.1063/1.1135773>
6. DeSerio, R. (1989). Spherical sector electrostatic analyzers for measurements of energy and angular distributions. *Review of Scientific Instruments*, 60 (3), 381–388. <https://doi.org/10.1063/1.1140386>
7. Daimon, H., Ino, S. (1990). Improvement of the spherical mirror analyzer. *Review of Scientific Instruments*, 61 (1), 57–60. <https://doi.org/10.1063/1.1141923>
8. Vilppola, J. H., Tanskanen, P. J., Barraclough, B. L. (1998). Simulations of a spherical section electrostatic analyzer. *COSPAR Colloquia Series*, 75–84. [https://doi.org/10.1016/s0964-2749\(98\)80013-9](https://doi.org/10.1016/s0964-2749(98)80013-9)
9. McGarity, J. O., Huber, A., Pantazis, J., Oberhardt, M. R., Hardy, D. A., Slutter, W. E. (1992). Compact ion/electron analyzer for spaceflight or laboratory use. *Review of Scientific Instruments*, 63 (3), 1973–1977. <https://doi.org/10.1063/1.1143314>
10. Tusche, C., Chen, Y.-J., Schneider, C. M., Kirschner, J. (2019). Imaging properties of hemispherical electrostatic energy analyzers for high resolution momentum microscopy. *Ultramicroscopy*, 206, 112815. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.112815>
11. Harkoma, M., Aksela, S. (2002). A study of the Double-pass Jost Electron Energy Analyzer. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 122 (3), 209–219. [https://doi.org/10.1016/s0368-2048\(01\)00354-1](https://doi.org/10.1016/s0368-2048(01)00354-1)
12. Takahashi, N., Matsui, F., Matsuda, H., Hamada, Y., Nakanishi, K., Namba, H., Daimon, H. (2008). Improvement of display-type spherical mirror analyzer for real space mapping of electronic and atomic structures. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 163 (1-3), 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2008.02.004>
13. Kotsugi, M., Miyatake, Y., Enomoto, K., Fukumoto, K., Kobayashi, A., Nakatani, T. et al. (2001). Construction of two-dimensional photoelectron spectrometer at SPring-8. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 467-468, 1493–1496. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(01\)00733-1](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(01)00733-1)
14. Huber, A., Plies, E. (1999). Numerical ray tracing of electrons in different 3D fringing fields of spherical deflectors. *Charged Particle Optics IV*, 3777, 264–274. <https://doi.org/10.1117/12.370136>
15. Sagara, T., Boesten, L., Nishida, S., Okada, K. (2000). Resolution improvements for hemispherical energy analyzers. *Review of Scientific Instruments*, 71 (11), 4201–4207. <https://doi.org/10.1063/1.1319979>
16. Ceballos, G. A., Grzelakowski, K. P. (2021). Electron Optical Optimization of an Imaging Energy Analyser: Real Model Field- and Trajectory Simulations Applied to k-Space Visualisation of Electronic States. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 19 (4). <https://doi.org/10.15598/aeec.v19i4.4289>
17. Grzelakowski, K. P. (2013). A flange on electron spectromicroscope with spherical deflector analyzer – simultaneous imaging of reciprocal and real spaces. *Ultramicroscopy*, 130, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2013.02.015>
18. Grzelakowski, K. (2012). A novel imaging energy filter for cathode lens electron microscopy. *Ultramicroscopy*, 116, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2012.03.010>
19. Nohno, T., Matsui, F., Hamada, Y., Matsumoto, H., Takeda, S., Hattori, K., Daimon, H. (2003). Development of High-Energy-Resolution Display-Type Photoelectron Spectrometer in the Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy Region. *Japanese Journal of Applied Physics*, 42 (Part 1, No. 7B), 4752–4755. <https://doi.org/10.1143/jjap.42.4752>
20. Kambarova, Z. (2023). Expansion of the functional capacities of electrostatic mirror analyzers for electron spectroscopy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (125)), 53–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289781>
21. Assylbekova, S. N., Saulebekov, A. O., Kambarova, Zh. T., Orakbai, A. (2016). Modeling of electrostatic collimator of charged particles beams on the basis of spherical mirror. *Eurasian Physical Technical Journal*, 13, 1 (25), 22–26.
22. Kambarova, Zh. T. (2021). About the possibility of creating an efficient energy analyzer of charged particle beams based on axiallysymmetric octupole-cylindrical field. *Eurasian Physical Technical Journal*, 18 (2), 96–102. <https://doi.org/10.31489/2021no2/96-102>
23. Kambarova, Zh. T., Trubitsyn, A. A., Saulebekov, A. O. (2018). Axially Symmetric Energy Analyzer Based on the Electrostatic Decapole-Cylindrical Field. *Technical Physics*, 63 (11), 1667–1671. <https://doi.org/10.1134/s1063784218110142>
24. Zashkvara, V. V., Tyndyk, N. N. (1999). The method for the calculation of multipole-cylindrical fields. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 423 (2-3), 223–231. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(98\)01262-5](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(98)01262-5)
25. Zashkvara, V. V., Tyndyk, N. N. (1996). Potential fields based on circular multipole series. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 370 (2-3), 452–460. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00809-8](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00809-8)
26. Sautbekova, Z., Trubitsyn, A. (2022). Focus CPM software for trajectory analysis of real axially symmetric electrostatic mirrors: methods and algorithms. *Eurasian Physical Technical Journal*, 19 (3 (41)), 91–96. <https://doi.org/10.31489/2022no3/91-96>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342160

РЕАЛІЗАЦІЯ ЧЕРГОВАНОГО ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПОСТІЙНО-ПОСТІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З БАГАТОСТУПЕНЕВИМ ЗАРЯДЖАННЯМ ПОСТІЙНИМ СТРУМОМ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ СТІЙКИХ ДО ПЕРЕШКОД СТАНЦІЙ ЗАМІНИ АКУМУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ (с. 6–18)

Sonki Prasetya, Eka Prasetyono, Mochammad Ari Bagus Nugroho, Epyk Sunarno, Muhammad Fikri Rizki, Haolia Rahman, Muhammad Hidayat Tullah, Jazuli Fadil, Teguh Suprianto, Lauhil Mahfudz Hayusman

У цьому дослідженні представлено двонаправлений неінвертуючий понижувально-підвищувальний перетворювач з чергуванням, призначений для станцій заміни акумуляторів (СЗА) громадських електромобілів. Це дослідження вирішує критичну проблему вразливості СЗА до відключень основного живлення, що загрожує їхній експлуатаційній надійності. Розроблене рішення являє собою пристрій, який не тільки виконує ефективну зарядку, але й функціонує як аварійне джерело живлення, використовуючи енергію від підключених акумуляторів під час збою в мережі. Методологія включає в себе черговану топологію та багатоступеневий метод зарядки постійним струмом (БМЗПС), керований нечітким логічним контролером (НЛК). Експериментальні результати показують, що чергування успішно збільшило потужність до 1,1 кВт, досягнувши середнього ККД 93,44%. Відмінною особливістю результату є зменшення пульсацій вихідного струму на 47,7% до 0,92%. Це пояснюється ефектом придушення пульсацій, властивим схемі з чергуванням, що є ключовою особливістю для збереження довгострокового стану акумулятора. Крім того, метод БМЗПС досяг скорочення часу виконання на 13,7% порівняно зі звичайним методом постійного струму-постійної напруги, із загальною тривалістю заряджання 66,8 хвилини. Цей перевірений прототип успішно продемонстрував безперешкодний та автоматичний перехід в аварійний режим під час відключення живлення, безпосередньо відповідаючи на проблему надійності СЗА. Прототип також підтвердив свою двонаправлену функціональність та безперешкодний перехід від стандартного заряджання до режиму аварійного живлення. Метою цього дослідження є практичне та високопродуктивне інтегроване рішення для СЗА, яке ефективно вирішує проблеми вразливості шляхом підвищення надійності та ефективності часу заряджання, забезпечуючи безперервну роботу.

Ключові слова: станція заміни акумуляторів, багатоступеневий постійний струм, чергований двонаправлений перетворювач.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342301

ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ІЗОЛЯЦІЇ ВСИПНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ШВИДКОПЛИННИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ (с. 19–30)

В. В. Чумак, М. А. Коваленко, О. Л. Тимошук, Р. П. Духно

Об'єктом дослідження є швидкоплинні процеси, що відбуваються в асинхронному двигуні із короткозамкненим ротором та всипною обмоткою статора. Досліджувані процеси використовуються для створення ефективних діагностичних методів оцінки стану найменш надійного елемента електричної машини – ізоляції обмоток. В роботі вирішується проблема, пов'язана із підвищенням експлуатаційної надійності електричних машин зі всипними обмотками.

Представлена високочастотна модель швидкоплинних перехідних процесів в обмотках електричних машин з метою неруйнівної діагностики ізоляції. Ця модель дозволяє аналізувати високочастотні та імпульсні явища з еквівалентною частотою до десятків МГц, які при експлуатації машини можуть виникати при комутаційних і атмосферних перенапруженнях, а також при живленні електричних двигунів від інверторів. Розробка моделі базується на основі частотного та часового діапазонів при вищезгаданих впливах на прикладі малопотужного багатовиткового асинхронного двигуна.

Для створення моделі використовувалась багатоланкова ланцюгова схема заміщення у вигляді послідовно з'єднаних чотириполюсників з індуктивно-резистивно-ємнісними параметрами, що відповідають частинам фази обмотки з умовно однаковими зосередженими параметрами.

Створена модель та запропонований метод дозволяє досягати необхідних випробувальних перенапруг для виявлення прихованих і нерозвинених дефектів з мінімальним щадним енергетичним впливом без її незворотного руйнування. Врахування розподілених параметрів секцій обмотки у поєднанні з імпульсним характером збудження забезпечують неруйнівний контроль всипних обмоток машин змінного струму у порівнянні з класичними випробувальними методами.

Запропонований метод дозволяє отримати більш в 2–2,5 рази повздовжні випробувальні градієнти при співмірному енергетичному впливі на рівні 0,1 Дж. Отримані результати дозволять підвищити надійність експлуатації електричних машин на підприємствах за умов втілення розробленого методу в систему планово-попереджувальних ремонтів електрообладнання.

Ключові слова: високочастотна модель, ланцюгова схема заміщення, хвильові процеси, діагностика ізоляції обмоток.

DOI: 10.15587/2706-5448.2025.341525

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООБМІНУ В ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЯХ З ЛОКАЛЬНИМ ПРИПОВЕРХНЕВИМ ТА ВНУТРІШНІМ НАГРІВАННЯМ (с. 31–39)

В. І. Гавриш, С. І. Яцишин, В. Ю. Майхер, О. Д. Грицай, Ф. М. Гончар

Об'єктом дослідження є процеси теплообміну для термочутливих середовищ з локальним приповерхневим та внутрішнім нагріванням. Внаслідок теплового навантаження виникають значні температурні градієнти. Для встановлення температурних режимів ефективної роботи електронних пристроїв розроблено лінійні та нелінійні математичні моделі визначення температурного поля, що дасть змогу в подальшому проаналізувати температурні режими.

На основі сформульованих лінійних та нелінійних 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. Достовірність отриманих результатів підтверджується отриманими результатами експерименту та визначеними числовими значеннями розподілу температури в середовищі.

Для ефективного опису локального нагрівання використано теорію узагальнених функцій. Запроваджено спосіб лінеаризації нелінійних математичних моделей. У результаті отримано лінійні диференціальні рівняння другого порядку з частковими похідними і сингулярною правою частиною.

Отримані числові результати відображають розподіл температури в середовищі за просторовими координатами для заданих геометричних та теплофізичних параметрів. Кількість розбиттів інтервалу $(0; x^*)$ вибрано рівною 9, що дало змогу отримати числові значення температури з точністю 10^{-6} . Отримані числові значення температури для вибраного матеріалу (кремній) за лінійної температурної залежності коефіцієнта теплопровідності відрізняються від результатів, отриманих для його сталого значення, на 2%. Розроблені математичні моделі теплообміну дають змогу аналізувати плоскі ізотропні середовища щодо їх термостійкості.

Ключові слова: температурне поле, теплопровідність матеріалу, термостійкість конструкцій, термочутливий матеріал, теплоактивна зона.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342161

ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИСОКОТОЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ДЕФОРМАЦІЙ У БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗА ДОПОМОГОЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ (с. 41–49)

Nurzhigit Smailov, Amandyk Tuleshov, Akezhan Sabibolda, Yersaiyn Mailybayev, Nurzhamal Kashkimbayeva, Ainur Kuttybayeva, Gulbakhar Yussupova, Askhat Batyrkaliyev, Beibarys Sekenov, Aziskhan Amir

Об'єктом цього дослідження є процес деформації в залізобетонних конструкційних елементах, оснащених вбудованими волоконно-оптичними датчиками. Розглянута проблема відповідає невирішеним питанням, виявленим у попередніх дослідженнях, а саме, відсутності стандартизованої кількісної оцінки точності та стабільності вимірювання волоконно-оптичної деформації. Незважаючи на високу лабораторну точність, існуючі методи демонструють знижену довгострокову надійність, перехресну чутливість до температури та деформації, а також невідповідність калібрування при застосуванні до реальних конструкцій.

Основні результати показують, що волоконні брегівські решітки (ВБР) та інтерферометричні датчики досягли субмікрометрової роздільної здатності деформації з відхиленнями менше 2–3 мє та довготривалим дрейфом менше 0,5%. Вимірювання залишалися стабільними при змінному навантаженні та температурі, що підтверджує високу відтворюваність та електромагнітну стійкість. Ці результати підтверджують гіпотезу про те, що зміщення оптичної довжини хвилі безпосередньо відповідають механічній деформації, забезпечуючи надійне виявлення деформації без повторного калібрування.

Ця ефективність впливає з власного фотопружного зв'язку та чутливості показника заломлення оптичного волокна, які забезпечують нанометричну роздільну здатність, корозійну стійкість та довгострокову експлуатаційну стабільність. Запропонований метод застосовний для довгострокового моніторингу мостів, тунелів та висотних споруд, що піддаються впливу екологічних та циклічних навантажень. Тому дослідження високоточних волоконно-оптичних вимірювань деформації залишаються науково актуальними для підвищення безпеки та довговічності сучасних цивільних конструкцій.

Ключові слова: волоконно-оптичний датчик, вимірювання деформації, будівельна конструкція, брегівська решітка, структурний моніторинг.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342477

ПОБУДОВА ЕЛЕКТРОННО-ОПТИЧНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО КВАЗИСФЕРИЧНОГО ЕНЕРГООАНАЛІЗАТОРА ДЕФЛЕКТОРНОГО ТИПУ (с. 50–59)

Zhanar Kambarova, Serik Kassymov

У цьому дослідженні розглянуто електростатичні енергоаналізатори дефлекторного типу, призначені для аналізу енергії потоків заряджених частинок.

Метою роботи є усунення квадратичних кутових аберацій, характерних для класичних сферичних енергоаналізаторів дефлекторного типу, які обмежують якість кутового фокусування та енергетичну роздільну здатність приладів.

Запропоновано електронно-оптичну схему електростатичного квазисферичного енергоаналізатора дефлекторного типу, поле якого синтезоване з використанням мультипольного підходу. Електростатичне поле енергоаналізатора являє собою суперпозицію осесиметричного гексаполя та сферичного поля. Аналітичні розрахунки показали, що вибором коефіцієнта, який визначає ваговий внесок осесиметричного гексаполя, можна повністю компенсувати кутові аберації другого порядку та суттєво покращити фокусувальні властивості квазисферичного енергоаналізатора.

Визначено профіль відхиляючих електродів енергоаналізатора, який забезпечує необхідний просторовий розподіл потенціалу відхиляючого поля для досягнення заданих електронно-оптичних параметрів. За допомогою чисельної програми «Focus» виконано моделювання електронно-оптичної схеми квазисферичного енергоаналізатора та розрахунок траєкторій руху заряджених частинок.

Електронно-оптична схема енергоаналізатора реалізує режим кутового фокусування другого порядку типу «вісь-кільце». Побудовано інструментальну функцію схеми, оцінено відносну енергетичну роздільну здатність і світлосилу енергоаналізатора. Чисельні результати показали, що відносна енергетична роздільна здатність енергоаналізатора становить 1,6% при світлосилі 17,5% від 2π , що підтверджує ефективність запропонованої схеми.

Запропонована електронно-оптична схема може бути використана для розроблення реальних конструкцій нових високороздільних спектрометрів, призначених для аналізу потоків заряджених частинок.

Ключові слова: мультипольний підхід, електростатичний енергоаналізатор дефлекторного типу, квазисферичне поле, осесиметричний мультиполь, кутові аберації.