

ABSTRACT AND REFERENCES

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.

DESIGN OF A SCHEME TO PROTECT TRANSFORMERS AGAINST BUSHING INSULATION DAMAGE, IN ORDER TO MODERNIZE ENERGY FACILITIES (p. 6–17)**Oleksandr Sakhno**

ENERGY AUTOMATION LLC, Zaporizhzhya, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3283-3731>**Serhii Shylo**

Zaporizhzhia Polytechnic National University,

Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4094-6269>**Liudmyla Skrupska**

Zaporizhzhia Polytechnic National University,

Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9494-1009>**Kostiantyn Odiyaka**

Zaporizhzhia Polytechnic National University,

Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4583-3845>

This study's object is a relay protection scheme against damage to transformers (autotransformers) and 35–750 kV shunt reactors as a result of bushing insulation breakdown.

The study investigates the possibility of improving the efficiency of the relay protection of transformer equipment (TrE). The task relates to the widespread application of outdated TrE protection schemes and devices that account for their high cost, low operational efficiency, and may even harm TrE.

This paper reports the results of investigating current signals from the measuring terminals of bushings and formulates basic requirements for implementing modernized protection schemes based on microprocessor monitoring unit. The proposed protection scheme modernization demonstrates improved operational characteristics: increased safety for personnel and equipment, reduced probability of false trips, decreased weight and dimensions, as well as cost. These characteristics were achieved by using a microprocessor device, reducing the length of measurement circuits, excluding matching transformers from the scheme, applying coupling devices with protection circuit.

The effectiveness of using software filtering of current signals based on the discrete Fourier transform algorithm has been proposed and proven for excluding influence currents on the resulting unbalance vector. The inexpediency of accounting for all, except the 1st harmonic, components of insulation currents was demonstrated. The normalized value of the unbalance, while using full signals, was 14%, instead of 1.15%.

The results could be used to manufacture and operate relay protection schemes and devices against 35–750 kV TrE damage caused by breakdown of bushing insulation to improve the reliability of power facilities.

Keywords: bushing insulation breakdown, transformer's relay protection, sum of currents method, balance method.

References

1. An international survey on failures in large power transformers in service. *Electra*. Available at: <https://www.scribd.com/document/500371751/An-international-survey-on-failures-in-large-power-transformers-in-service>
2. Tenbohlen, S., Hanif, Z., Martin, D. (2023). Analysis of Major Failures of Power Transformers. In Proceedings of the Cigre SC A2 & 6th International Colloquium Transformer Research and Asset Management (ICTRAM). Available at: https://www.researchgate.net/publication/375860407_Analysis_of_Major_Failures_of_Power_Transformers
3. Yang, F., Zhang, Y., Wu, X., Wu, J. (2023). Study on the Partial Surface Discharge Process of Oil-Paper Insulated Transformer Bushing with Defective Condenser Layer. *Applied Sciences*, 13 (13), 7621. <https://doi.org/10.3390/app13137621>
4. Case Histories for Mitigating Transformer Bushing Risk (2022). Zimmar Holdings Ltd./INMR. Available at: <https://www.inmr.com/case-histories-for-mitigating-transformer-bushing-risk/>
5. Abri, T. A., Lal, M., Balushi, I. A., Zedjali, M. A. (2017). Bushing Failure- Investigation process & findings. *Procedia Engineering*, 202, 88–108. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.697>
6. Feilat, E., Metwally, I., Al-Matri, S., Al-Abri, A. (2013). Analysis of the Root Causes of Transformer Bushing Failures. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 7 (6), 791–796. Available at: https://www.researchgate.net/publication/281147199_Analysis_of_the_Root_Causes_of_Transformer_Bushing_Failures
7. Lachman, M. F., Walter, W., von Guggenberg, P. A. (2000). On-line diagnostics of high-voltage bushings and current transformers using the sum current method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15 (1), 155–162. <https://doi.org/10.1109/61.847244>
8. Brusetti, R. (2004). Experience with On-line Diagnostics for Bushings and Current Transformers. *Electric Energy N&D Magazine*. Available at: <https://electricenergyonline.com/EE/MagPDF/18.pdf>
9. Stirl, T., Skrzypek, R., Tenbohlen, S., Vilaithong, R. (2006). Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System. CMD. Available at: https://www.ieh.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2006_CMD2006-Tobias_Stirl.pdf
10. Zhang, J., Wang, F., Li, J., Ran, H., Li, X., Fu, Q. (2017). Breakdown Voltage and Its Influencing Factors of Thermally Aged Oil-Impregnated Paper at Pulsating DC Voltage. *Energies*, 10 (9), 1411. <https://doi.org/10.3390/en10091411>
11. Nasrat, L. S., Kassem, N., Shukry, N. (2013). Aging Effect on Characteristics of Oil Impregnated Insulation Paper for Power Transformers. *Engineering*, 05 (01), 1–7. <https://doi.org/10.4236/eng.2013.51001>
12. Sakhno, O., Skrupska, L., Odiyaka, K., Vasylevskyi, V., Shylo, S. (2025). Diagnostics of the technical state of high-voltage equipment under operating voltage. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (82)), 35–44. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325777>
13. Jerbic, V., Keitoue, S., Puskaric, J., Tomic, I. (2024). Improving the Reliability of Online Bushing Monitoring. *Journal of Energy - Energija*, 73 (1), 18–23. <https://doi.org/10.37798/2024731511>
14. Sakhno, A. A., Skrupskaya, L. S., Domoroshchyn, S. V. (2019). Improvement of the nonequilibrium-compensation method for state diagnostics of high-voltage apparatus with condenser insulation. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1 (4), 56–64. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2019-4-5>
15. Melo, M. A. C., Alves, M. E. G., Moura, G. A. (2008). Experience with on-line monitoring of capacitance and tangent delta of condensive bushings. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 1–6. <https://doi.org/10.1109/tde-la.2008.4641713>
16. Sakhno, O., Odiyaka, K., Skrupska, L. (2025). Improving the protection of high-voltage equipment with condenser-type insulation during

technical condition monitoring under operating voltage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (135)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.330655>

17. Evaluating Reliability of Bushings & Case Histories (2023). Zimmar Holdings Ltd./INMR. Available at: <https://www.inmr.com/evaluating-reliability-of-bushings/>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338866

ENHANCING INDUSTRIAL POWER SYSTEMS: A CASE STUDY ON ELECTRICAL SAVINGS IMPROVEMENT WITH MICROBIAL FUEL CELL (p. 18–27)

Levin Halim

Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2398-9160>

Nico Saputro

Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0842-1155>

Jenny N M Tan-Soetedjo

Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5353-8021>

Anastasia Prima Kristijarti

Parahyangan Catholic University, Bandung, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4458-7845>

The object of the study is the industrial feeder system rated at 100 kVA and 150 kVA, which was integrated with an MFC system operating in parallel with the grid. This research explores the application of microbial fuel cells (MFCs) for industrial-scale power systems, focusing on their integration with medium-capacity feeders to reduce reliance on grid electricity. The central problem addressed is the scarcity of long-term, real-world demonstrations of MFCs operating in parallel with the public grid, particularly in feeders rated at 100 kVA and 150 kVA, where stable and reliable performance is critical. To overcome this gap, customized MFC panels were designed, equipped with a Delta PLC-based control system, and installed on two industrial feeders. Their operation was monitored continuously for nine months using PM-5350 power meters to capture load, grid, and MFC contributions. The results demonstrate that the MFCs consistently supplied a fraction of the feeder demand, reducing grid energy consumption by 9.68–18.48%, with an overall average saving of 12.38%. Corresponding reductions in electricity costs reached up to USD 1,034 per month. Differences in savings between the two feeders were explained by variations in load profiles, synchronization strategies, and microbial performance stability over time. A distinctive outcome of this study is the successful demonstration of reliable, long-horizon MFC operation under industrial conditions, enabled by protective interconnection schemes and automated control. The practical implications are significant: MFCs can be deployed on medium-scale feeders in manufacturing or processing industries to achieve measurable cost reductions while simultaneously contributing to renewable energy adoption and waste-to-energy initiatives. These findings strengthen the case for MFCs as a viable complement to conventional distributed generation technologies.

Keywords: microbial fuel cells, industrial feeders, grid integration, energy savings, cost reduction.

References

1. Hung, Y.-H., Liu, T.-Y., Chen, H.-Y. (2019). Renewable Coffee Waste-Derived Porous Carbons as Anode Materials for High-Performance Sustainable Microbial Fuel Cells. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7 (20), 16991–16999. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02405>
2. Kusmayadi, A., Leong, Y. K., Yen, H., Huang, C., Dong, C., Chang, J. (2020). Microalgae-microbial fuel cell (mMFC): an integrated process for electricity generation, wastewater treatment, CO₂ sequestration and biomass production. *International Journal of Energy Research*, 44 (12), 9254–9265. <https://doi.org/10.1002/er.5531>
3. Yalcinkaya, F., Torres-Mendieta, R., Hruza, J., Vávrová, A., Svobodová, L., Pietrelli, A., Ieropoulos, I. (2024). Nanofiber applications in microbial fuel cells for enhanced energy generation: a mini review. *RSC Advances*, 14 (13), 9122–9136. <https://doi.org/10.1039/d4ra00674g>
4. Kordek-Khalil, K., Altiok, E., Salvian, A., Siekierka, A., Torres-Mendieta, R., Avignone-Rossa, C. et al. (2023). Nanocomposite use in MFCs: a state of the art review. *Sustainable Energy & Fuels*, 7 (24), 5608–5624. <https://doi.org/10.1039/d3se00975k>
5. Chaijak, P., Thipraksa, J. (2022). Improved Performance of a Novel-Model Laccase Based Microbial Fuel Cell (LB-MFC) with Edible Mushroom as a Whole-Cell Biocatalyst. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31 (5), 4481–4485. <https://doi.org/10.15244/pjoes/147196>
6. Goto, Y., Yoshida, N. (2019). Scaling up Microbial Fuel Cells for Treating Swine Wastewater. *Water*, 11 (9), 1803. <https://doi.org/10.3390/w11091803>
7. Jabbar, N., Alardhi, S., Al-Jadir, T., Abed Dhahad, H. (2023). Contaminants Removal from Real Refinery Wastewater Associated with Energy Generation in Microbial Fuel Cell. *Journal of Ecological Engineering*, 24 (1), 107–114. <https://doi.org/10.12911/22998993/156081>
8. Mukherjee, A., Patel, R., Zaveri, P., Shah, M. T., Munshi, N. S. (2022). Microbial fuel cell performance for aromatic hydrocarbon bioremediation and common effluent treatment plant wastewater treatment with bioelectricity generation through series-parallel connection. *Letters in Applied Microbiology*, 75 (4), 785–795. <https://doi.org/10.1111/lam.13612>
9. Singh, S., Suresh, S. (2020). A novel microbial fuel cell technology for energy generation and comparison of power densities for different electrodes using nanotechnology. *Rasayan Journal of Chemistry*, 13 (01), 672–675. <https://doi.org/10.31788/rjc.2020.1315556>
10. Muazu, R. I., Sadhukhan, J., Venkata Mohan, S., Gadkari, S. (2023). Hexavalent chromium waste removal via bioelectrochemical systems – a life cycle assessment perspective. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9 (10), 2487–2500. <https://doi.org/10.1039/d3ew00344b>
11. Naseer, M. N., Zaidi, A. A., Dutta, K., Jaafar, J., Wahab, Y. A., Cai, Y. (2023). A Novel Computational Platform for Steady-State and Dynamic Simulation of Dual-Chambered Microbial Fuel Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 170 (9), 094504. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/acf882>
12. Xu, L., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., Hao, X. (2015). The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46 (1), 60–91. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1061884>
13. Li, Y., Wu, Y., Puranik, S., Lei, Y., Vadas, T., Li, B. (2014). Metals as electron acceptors in single-chamber microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 269, 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.06.117>
14. Li, W.-W., Yu, H.-Q. (2013). Utilization of Microbe-Derived Electricity for Practical Application. *Environmental Science & Technology*, 48 (1), 17–18. <https://doi.org/10.1021/es405023b>
15. Obileke, K., Onyeaka, H., Meyer, E. L., Nwoko, N. (2021). Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity genera-

- tion: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 125, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>
16. Ramya, M., Senthil Kumar, P. (2022). A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells. *Chemosphere*, 288, 132512. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132512>
 17. Patwardhan, S. B., Savla, N., Pandit, S., Gupta, P. K., Mathuriya, A. S., Lahiri, D. et al. (2021). Microbial Fuel Cell United with Other Existing Technologies for Enhanced Power Generation and Efficient Wastewater Treatment. *Applied Sciences*, 11 (22), 10777. <https://doi.org/10.3390/app112210777>
 18. Thapa, B. S., Pandit, S., Patwardhan, S. B., Tripathi, S., Mathuriya, A. S., Gupta, P. K. et al. (2022). Application of Microbial Fuel Cell (MFC) for Pharmaceutical Wastewater Treatment: An Overview and Future Perspectives. *Sustainability*, 14 (14), 8379. <https://doi.org/10.3390/su14148379>
 19. Freis, S. M., Alexander, J. D., Anderson, J. E., Corley, R. P., De La Vega, A. I., Gustavson, D. E. et al. (2024). Associations between executive functions assessed in different contexts in a genetically informative sample. *Journal of Experimental Psychology: General*, 153 (1), 70–85. <https://doi.org/10.1037/xge0001471>
 20. Pandit, S., Savla, N., Sonawane, J. M., Sani, A. M., Gupta, P. K., Mathuriya, A. S. et al. (2021). Agricultural Waste and Wastewater as Feedstock for Bioelectricity Generation Using Microbial Fuel Cells: Recent Advances. *Fermentation*, 7 (3), 169. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030169>
 21. Xing, H., Stuart, C., Spence, S., Chen, H. (2021). Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives. *Sustainability*, 13 (3), 1213. <https://doi.org/10.3390/su13031213>
 22. Niju, S., Priyadarshini, K. (2023). A review on microbial fuel cell technology for Brewery industry wastewater treatment – From fundamentals to pilot scale studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42 (6). <https://doi.org/10.1002/ep.14191>
 23. Abir Hossain, A.-M., Masud, N., Yasin, M. S., Ali, M. (2020). Analysis of the Performance of Microbial Fuel Cell as a Potential Energy Storage Device. *Proceedings of International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES)*, 6, 149–155. <https://doi.org/10.5109/4102481>
 24. Jatoi, A. S., Baloch, A. G., Jadhav, A., Nizamuddin, S., Aziz, S., Soomro, S. A. et al. (2019). Improving fermentation industry sludge treatment as well as energy production with constructed dual chamber microbial fuel cell. *SN Applied Sciences*, 2 (1). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1826-0>
 25. Breheny, M., Bowman, K., Farahmand, N., Gomaa, O., Keshavarz, T., Kyazze, G. (2019). Biocatalytic electrode improvement strategies in microbial fuel cell systems. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94 (7), 2081–2091. <https://doi.org/10.1002/jctb.5916>
 26. Demir, Ö., Gümüş, E. (2023). Effects of pre-treated sludge on sludge stabilization and electricity generation in microbial fuel cell. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 42 (5). <https://doi.org/10.1002/ep.14119>
 27. Din, M. I., Ahmed, M., Ahmad, M., Iqbal, M., Ahmad, Z., Hussain, Z. et al. (2023). Investigating the Activity of Carbon Fiber Electrode for Electricity Generation from Waste Potatoes in a Single-Chambered Microbial Fuel Cell. *Journal of Chemistry*, 2023, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2023/8520657>
 28. Saleh, M., Yalvaç, M., Halef, L., Hekim, M. Ş., Arslan, H. (2020). Bulgur industry wastewater treatment by microbial fuel cell – exploratory study. *Turkish Journal of Engineering*, 4 (4), 203–208. <https://doi.org/10.31127/tuje.646603>
 29. Chaijak, P., Michu, P. (2022). Modified Water Hyacinth Biochar as a Low-Cost Supercapacitor Electrode for Electricity Generation From Pharmaceutical Wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31 (6), 5471–5475. <https://doi.org/10.15244/pjoes/150463>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341710

DESIGN OF AN ALTERNATIVE ENERGY SOURCE BASED ON A MULTISTAGE THERMOACOUSTIC ENGINE WITH EXTERNAL HEAT SUPPLY (p. 28–37)

Aliya Alkina

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>

Yermek Sarsikeyev

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
Astana, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>

Ali Mekhtiyev

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Yelena Neshina

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Ruslan Mekhtiyev

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of KazakhstanORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5416-3444>

This study considers a multistage thermoacoustic engine with an external heat supply, used to convert low-grade heat from solar and geothermal sources into electrical energy.

The study [k of improving the efficiency of thermoacoustic engines using low-grade heat sources remains unresolved because of high self-starting temperatures and significant heat loss. This study examines an approach based on the design of a multistage thermoacoustic engine with an external heat supply, which reduces the starting temperature and improves efficiency.

To achieve this goal, mathematical modeling was performed in the DeltaEC environment using a linear approximation of Rott equations; a laboratory prototype of an eight-stage engine was designed. The results showed that at a heater temperature of 105°C and an average pressure of 2 bar, an acoustic oscillation frequency of 64 Hz and an electrical power of up to 80 W are achieved with an efficiency of approximately 12%.

Distinctive features of the proposed structure include optimized stage and resonator geometry, the use of a traveling acoustic wave, as well as the ability to operate at low heating temperatures, which distinguishes it from existing analogs. It has been established that increasing the stage diameter to an optimal ratio of 10:1 relative to the resonator, improving thermal insulation, and increasing pressure to 8 bar could increase efficiency by up to 40%.

The practical significance of this work is its potential for implementing the designed engine in autonomous power supply systems in rural and remote areas of the Republic of Kazakhstan where electricity costs are traditionally higher and fuel delivery is difficult. The results confirm the feasibility of using thermoacoustic technologies for sustainable and environmentally friendly energy supply.

Keywords: thermoacoustic engine, low-grade heat, autonomous power supply, energy efficiency, geothermal, Stirling engine.

References

1. Beisengazin, K. (2025). Coal Sector of Kazakhstan: Challenges and Opportunities for Decarbonizing the Economy. Integrated Policy Strategies and Regional Policy Coordination for Resilient, Green

- and Transformative Development: Supporting Selected Asian BRI Partner Countries to Achieve 2030 Sustainable Development Agenda. Available at: https://unctad.org/system/files/information-document/unda2030d26-kazakhstan-coal_en.pdf
2. Smatayeva, A., Temerbulatova, Z., Kakizhanova, T. (2024). The Impact of Economic and Environmental Factors on the Consumption of Renewable Energy: The Case of Kazakhstan. *Eurasian Journal of Economic and Business Studies*, 68 (4), 61–75. <https://doi.org/10.47703/ejeb.v68i4.443>
 3. Zhakiyev, N., Burkhanova, D., Nurkanat, A., Zhussipkaliyeva, S., Sospanova, A., Khamzina, A. (2025). Green energy in grey areas: The financial and policy challenges of Kazakhstan's energy transition. *Energy Research & Social Science*, 124, 104046. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104046>
 4. Minazhova, S., Kurrat, M., Ongar, B., Georgiev, A. (2025). Deploying a rooftop PV panels in the southern regions of Kazakhstan. *Energy*, 320, 135205. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135205>
 5. Mouraviev, N. (2021). Renewable energy in Kazakhstan: Challenges to policy and governance. *Energy Policy*, 149, 112051. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112051>
 6. Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. Oxford: Clarendon Pres, 276. Available at: <https://www.scribd.com/doc/45062130/Stirling-Engines-G-Walker-Oxford-1980-WW>
 7. Fit, W. C. (Ed.) (1980). *Steam Stirling Engines You Can Build*. Village Press Publications, 169. Available at: <https://www.scribd.com/document/820789063/Steam-Stirling-Engines-You-Can-Build>
 8. Mekhtiyev, A. D., Sarsikayev, Y. Zh., Yugay, V. V., Neshina, E. G., Alkina, A. D. (2021). Thermoacoustic engine as a low-power cogeneration energy source for autonomous consumer power supply. *Eurasian Physical Technical Journal*, 18 (12 (36)), 60–66. <https://doi.org/10.31489/2021no2/60-66>
 9. Tijani, M. E. H., Spoelstra, S. (2011). A high performance thermoacoustic engine. *Journal of Applied Physics*, 110 (9). <https://doi.org/10.1063/1.3658872>
 10. Kruse, A., Ruziewicz, A., Tajmar, M., Gnutek, Z. (2017). A numerical study of a looped-tube thermoacoustic engine with a single-stage for utilization of low-grade heat. *Energy Conversion and Management*, 149, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.010>
 11. de Blok, K. (2010). Novel 4-Stage Traveling Wave Thermoacoustic Power Generator. *ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting* collocated with 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 73–79. <https://doi.org/10.1115/fedsm-icnmm2010-30527>
 12. Sarsikayev, Y., Mekhtiyev, A., Neshina, Y., Alkina, A., Mekhtiyev, R., Sharipov, T. (2024). An Alternative Thermoacoustic Energy Source for Power Supply to Autonomous Consumers. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 12 (5), 184. <https://doi.org/10.15866/irecon.v12i5.24875>
 13. Kropachev, P. A., Mekhtiyev, A. D., Bulatbayev, F. N., Sarsikayev, Y. Zh. (2021). Method of restoring pivot connections cast iron Bushings of heat engine with external heat supply. *Metalurgija*, 60 (3-4), 343–346. Available at: <https://hrcak.srce.hr/file/372269>
 14. Nikonova, T., Zharkevich, O., Dandybaev, E., Baimuldin, M., Daich, L., Sichkarenko, A., Kotov, E. (2021). Developing a Measuring System for Monitoring the Thickness of the 6 m Wide HDPE/LDPE Polymer Geomembrane with Its Continuous Flow Using Automation Equipment. *Applied Sciences*, 11 (21), 10045. <https://doi.org/10.3390/app112110045>
 15. Mekhtiyev, A., Breido, I., Buzyakov, R., Neshina, Y., Alkina, A. (2021). Development of low-pressure electric steam heater. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (112)), 34–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237873>
 16. Huntingford, F., Kisha, W. (2022). Algorithmic optimisation of the electrical power output of a low-cost, multicore thermoacoustic engine with varying resonator pressure. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101776. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101776>
 17. Farikhah, I., Elsharkawy, E. A., Nuroso, H., Novita, M., Marlina, D., Rahmatunnisa, K. et al. (2021). Study of Stack Length on Efficiency of Thermoacoustic Engine. *2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 580–582. <https://doi.org/10.1109/ecice52819.2021.9645691>
 18. Sun, D., Luo, K., Zhang, J., Yu, Y. S. W., Pan, H. (2021). A novel non-linear one-dimensional unsteady model for thermoacoustic engine and its application on a looped traveling-wave thermoacoustic engine. *Applied Acoustics*, 181, 108136. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108136>
 19. Guk, S., Lee, J., Kim, J., Lee, M. (2025). Advances and Challenges in Thermoacoustic Network Modeling for Hydrogen and Ammonia Combustors. *Energies*, 18 (2), 346. <https://doi.org/10.3390/en18020346>
 20. Korobko, V., Shevtsov, A., Serbin, S., Wen, H., Dzida, M. (2025). Experimental Study of a Phase-Change Thermoacoustic Engine for Maritime Waste Heat Recovery System. *Polish Maritime Research*, 32 (2), 84–93. <https://doi.org/10.2478/pomr-2025-0023>
 21. Baccoli, R., Di Meglio, A., Fenu, A., Massarotti, N. (2025). Design and performance of a ThermoAcoustic Electric Generator powered by waste-heat based on linear and nonlinear modelling. *Applied Thermal Engineering*, 276, 126938. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126938>
 22. Rodriguez, J., Dyson, R. W., Wernet, M. P., Leibach, R. J. (2025). Thermoacoustic Thermal Management for Electric Aircraft. *NASA Technical Report. AIAA SciTech Forum*. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20240015017>
 23. Xiao, L., Luo, K., Zhao, D., Wu, Z., Xu, J., Luo, E. (2024). A highly efficient heat-driven thermoacoustic cooling system: Detailed study. *Energy*, 293, 130610. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130610>
 24. Farikhah, I., Elsharkawy, E. A., Nuroso, H., Novita, M., Marlina, D., Rahmatunnisa, K. et al. (2021). Study of Stack Length on Efficiency of Thermoacoustic Engine. *2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 580–582. <https://doi.org/10.1109/ecice52819.2021.9645691>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342027

IMPROVING THE MODEL OF A SYSTEM THAT MAINTAINS A MICROCLIMATE REGIME IN A SINGLE-FAMILY HOUSE BY USING A REVERSIBLE HEAT PUMP (p. 38–47)

Oleksandr Shavolkin

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3914-0812>

Iryna Shvedchykova

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>

Oleksandr Demianchuk

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1199-7403>

Oleg Shcherbakov

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0728-9918>

This study mathematically models energy processes within the microclimate control system in a single-family house equipped with a reversible heat pump.

This paper reports an improved model of the microclimate system considering the dynamics to construct plots of electricity consumption under various operating conditions. Data from the cal-

culated thermal parameters of the building were applied. A model of the reversible heat pump has been proposed, based on manufacturer specifications, allowing for the assessment of electricity consumption across the full range of power and temperature variations.

The microclimate system model of the building with a heat pump has been improved by accounting for the building's thermal inertia. This makes it possible to evaluate temperature regimes and energy consumption under dynamic modes, bringing the simulated electricity usage closer to real-world values.

Hourly profiles of solar radiation and outdoor temperature for the building's location, along with expected schedules of internal heat gains, were used. Energy consumption and instantaneous power values, including peak loads, were assessed. It is shown that, for a building in Kyiv with a floor area of 120 m², under a heating mode, minimum electricity consumption occurs at a minimum heat carrier temperature of 35°C at a COP of 3.44.

The selected heat pump may operate under a monovalent mode down to -13°C. The potential for reducing energy consumption by adjusting the temperature regime is limited because of a significant increase in power demand from the heat pump under a dynamic mode.

Under a cooling mode, hourly air temperature profiles from historical data were used, along with representative values, to evaluate the range of energy consumption variation. An example involving changes in window area demonstrates the model's applicability for adjusting building parameters to reduce energy consumption.

Keywords: heat pump, energy saving, building's thermal state, thermal inertia, energy storage device.

References

1. Vanhoudt, D., Geysen, D., Claessens, B., Leemans, F., Jespers, L., Van Bael, J. (2014). An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy. *Renewable Energy*, 63, 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.021>
2. Chaikovskaya, E. (2020). Development of Smart Grid technology for maintaining the functioning of a biogas cogeneration system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (105)), 56–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205123>
3. Niekurzak, M., Lewicki, W., Drożdż, W., Miązek, P. (2022). Measures for Assessing the Effectiveness of Investments for Electricity and Heat Generation from the Hybrid Cooperation of a Photovoltaic Installation with a Heat Pump on the Example of a Household. *Energies*, 15 (16), 6089. <https://doi.org/10.3390/en15166089>
4. Zajacs, A., Lebedeva, K., Bogdanovičs, R. (2023). Evaluation of Heat Pump Operation in a Single-Family House. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 60 (3), 85–98. <https://doi.org/10.2478/lpts-2023-0019>
5. Wilbur, B., Fung, A. S., Kumar, R. (2024). Thermal System and Net-Zero-Carbon Least-Cost Design Optimization of New Detached Houses in Canada. *Buildings*, 14 (9), 2870. <https://doi.org/10.3390/buildings14092870>
6. Installation instructions AERO ILM. Available at: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/idm/teplovye-nasosy/29558/108525.pdf>
7. Zhou, K., Zhu, S., Wang, Y., Roskilly, A. P. (2024). Modelling and Experimental Characterisation of a Water-to-Air Thermoelectric Heat Pump with Thermal Energy Storage. *Energies*, 17 (2), 414. <https://doi.org/10.3390/en17020414>
8. Kahsay, M. B., Völler, S. (2025). Thermal energy storage for increasing self-consumption of grid connected photovoltaic systems: A case for Skjetlein High School, Norway. *Energy and Buildings*, 335, 115563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115563>
9. Pater, S. (2023). Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*, 16 (10), 4003. <https://doi.org/10.3390/en16104003>
10. Nibe F2120 8 Manuals. Available at: <https://www.manualslib.com/products/Nibe-F2120-8-6902998.html>
11. Mendaza, I. D. de C., Bak-Jensen, B., Chen, Z. (2013). Electric Boiler and Heat Pump Thermo-Electrical Models for Demand Side Management Analysis in Low Voltage Grids. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2 (1), 52–59. <https://doi.org/10.12720/sgce.2.1.52-59>
12. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Kolcun, M., Medved, D., Mazur, D., Kwiatkowski, B. (2024). Increasing photovoltaic self-consumption for objects using domestic hot water systems. *Archives of Electrical Engineering*, 73 (3), 573–573. <https://doi.org/10.24425/ae.2024.150884>
13. Dejvise, J., Tanthanuch, N. (2016). A Simplified Air-conditioning Systems Model with Energy Management. *Procedia Computer Science*, 86, 361–364. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.099>
14. Kim, N.-K., Shim, M.-H., Won, D. (2018). Building Energy Management Strategy Using an HVAC System and Energy Storage System. *Energies*, 11 (10), 2690. <https://doi.org/10.3390/en11102690>
15. House Heating System. MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ug/house-heating-system.html>
16. Reversible Heat Pump. MathWorks. Available at: <https://www.mathworks.com/help/hydro/ug/ReversibleHeatPumpExample.html>
17. Moctezuma-Sánchez, M., Espinoza Gómez, D., López-Sosa, L. B., Golpour, I., Morales-Máximo, M., González-Carabes, R. (2024). A Thermal Model for Rural Housing in Mexico: Towards the Construction of an Internal Temperature Assessment System Using Aerial Thermography. *Buildings*, 14 (10), 3075. <https://doi.org/10.3390/buildings14103075>
18. Behravan, A., Obermaier, R., Nasari, A. (2017). Thermal dynamic modeling and simulation of a heating system for a multi-zone office building equipped with demand controlled ventilation using MATLAB/Simulink. 2017 International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCSS), 103–108. <https://doi.org/10.1109/circsyssim.2017.8023191>
19. Boodi, A., Beddiar, K., Amirat, Y., Benbouzid, M. (2020). Simplified Building Thermal Model Development and Parameters Evaluation Using a Stochastic Approach. *Energies*, 13 (11), 2899. <https://doi.org/10.3390/en13112899>
20. Yuan, W., Guo, Y., Zhang, Y. (2024). Performance Research on Heating Performance of Battery Thermal Management Coupled with the Vapor Injection Heat Pump Air Conditioning. *World Electric Vehicle Journal*, 15 (1), 33. <https://doi.org/10.3390/wevj15010033>
21. He, J., Yu, L., Chen, Z., Qiu, D., Yue, D., Strbac, G. et al. (2025). H MPC-assisted Adversarial Inverse Reinforcement Learning for Smart Home Energy Management. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.00898>
22. Klepic, V., Wolf, M., Pröll, T. (2025). Streamlined Model Predictive Control for a Triple-Optimization of Thermal Comfort, Heating Costs, and Photovoltaic Self-Consumption. *IEEE Access*, 13, 115419–115432. <https://doi.org/10.1109/access.2025.3584388>
23. Photovoltaic geographical information system. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.

РОЗРОБКА СХЕМИ ЗАХИСТУ ТРАНСФОРМАТОРІВ ВІД ПОШКОДЖЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ВВОДІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ НА ЕНЕРГООБ'ЄКТАХ (с. 6–17)

О. А. Сахно, С. І. Шило, Л. С. Скрупська, К. В. Одіяка

Об'єкт дослідження – схема релейного захисту від пошкодження трансформаторів (автотрансформаторів) та шунтувальних реакторів 35–750 кВ в наслідок пробую ізоляції ввводів.

Робота присвячена пошуку можливостей підвищення ефективності роботи системи релейного захисту трансформаторного обладнання (ТРО). Проблема зумовлена широким застосуванням застарілих схем та пристроїв захисту ТРО, які мають високу собівартість реалізації, низьку ефективність роботи та навіть несуть небезпеку для ТРО.

В роботі представлено результати досліджень сигналів струмів з вимірювальних виводів ввводів, сформовані вимоги до виконання модернізованих схем захисту на базі мікропроцесорного блоку моніторингу. Запропонована модернізація схеми захисту, яка має покращені експлуатаційні характеристики: підвищену безпечність для персоналу та обладнання, зменшену вірогідності неправдивих спрацювань, зменшені маса-габаритні показники та собівартість. Досягнення цих характеристик зумовлено застосуванням: мікропроцесорного пристрою, скороченням довжини ланцюгів вимірювання, виключення із схеми погоджувальних трансформаторів, застосування пристроїв приєднання оснащених захистом. Запропоновано та доведено ефективність використання програмної фільтрації сигналів струмів на основі алгоритму дискретного перетворення Фур'є, для виключення струмів впливу з результуючого вектору небалансу. Дослідження показало недоцільність врахування всіх, окрім 1-ої гармоніки, складових струмів провідності ізоляції. Нормоване значення небалансу при використанні повних сигналів склало 14%, замість 1.15%.

Наведені результати можуть використовуватися при виробництві та експлуатації схем та пристроїв релейного захисту від пошкодження ТРО 35–750 кВ внаслідок пробую ізоляції ввводів для підвищити надійність енергооб'єктів.

Ключові слова: пробій ізоляції ввводів, релейний захист трансформатору, нерівноважно-компенсаційний метод, балансовий метод

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338866

ПОКРАЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ: ПРИКЛАД ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОБНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ (с. 18–27)

Levin Halim, Nico Saputro, Jenny N M Tan-Soetedjo, Anastasia Prima Kristijarti

Об'єктом дослідження є промислова система живлення потужністю 100 кВА та 150 кВА, яка була інтегрована з системою мікробних паливних елементів (МПЕ), що працює паралельно з мережею. Це дослідження представляє застосування мікробних паливних елементів (МПЕ) для промислових енергетичних систем, зосереджуючись на їх інтеграції з живильниками середньої потужності для зменшення залежності від електроенергії з мережі. Центральною проблемою, яка розглядається, є брак довгострокових, реальних демонстрацій МПЕ, що працюють паралельно з громадською мережею, особливо в живильниках потужністю 100 кВА та 150 кВА, де стабільна та надійна робота є критично важливою. Щоб подолати цю прогалину, були розроблені спеціалізовані панелі МПЕ, оснащені системою керування на базі ПЛК Delta та встановлені на двох промислових живильниках. Їхня робота безперервно контролювалася протягом дев'яти місяців за допомогою вимірювачів потужності РМ-5350 для фіксації навантаження, мережі та внеску МПЕ. Результати показують, що МПЕ стабільно забезпечували лише частину попиту живильників, зменшуючи споживання енергії з мережі на 9,68–18,48%, із загальною середньою економією 12,38%. Відповідне зниження витрат на електроенергію сягало 1034 доларів США на місяць. Різниця в економії між двома живильниками пояснювалася варіаціями в профілях навантаження, стратегіях синхронізації та стабільністю мікробної роботи з часом. Відмінним результатом цього дослідження є успішна демонстрація надійної, довгострокової роботи мікробних паливних елементів (МПЕ) в промислових умовах, що стало можливим завдяки схемам захисного з'єднання та автоматизованому керуванню. Практичні наслідки є значними: МПЕ можуть бути розгорнуті на живильниках середнього масштабу у виробничих або переробних галузях для досягнення вимірного зниження витрат, одночасно сприяючи впровадженню відновлюваної енергії та ініціативам з переробки відходів на енергію. Ці висновки підтверджують перевагу МПЕ як життєздатного доповнення до традиційних технологій розподіленої генерації.

Ключові слова: мікробні паливні елементи, промислові живильники, інтеграція в мережу, енергозбереження, зниження витрат.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341710

РОЗРОБЛЕННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ БАГАТОСТУПІНЕВОГО ТЕРМОАКУСТИЧНОГО ДВИГУНА З ЗОВНІШНІМ ПІДВЕДЕННЯМ ТЕПЛОТИ (с. 28–37)

Aliya Alkina, Yermek Sarsikeev, Ali Mekhtiyev, Yelena Neshina, Ruslan Mekhtiyev

Об'єктом дослідження є багатоступеневий термоакустичний двигун із зовнішнім підведенням теплоти, що використовується для перетворення низькопотенційного тепла від сонячних і геотермальних джерел в електричну енергію.

Проблема підвищення ефективності термоакустичних двигунів при використанні низькопотенційних джерел тепла залишається невирішеною через високі температури самозапуску та значні теплові втрати. У дослідженні розглянуто підхід, заснований на

створенні багатоступеневого термоакустичного двигуна із зовнішнім підведенням теплоти, який забезпечує зниження температури запуску та зростання коефіцієнта корисної дії. Для досягнення цієї мети виконано математичне моделювання в середовищі DeltaEC із використанням лінійної апроксимації рівнянь Ротта та створено лабораторний зразок восьмиступеневого двигуна.

Отримані результати показали, що при температурі нагрівача 105 °C і середньому тиску 2 бар досягається частота акустичних коливань 64 Гц і електрична потужність до 80 Вт при ККД близько 12 %. Відмінною особливістю запропонованої конструкції є оптимізація геометрії ступенів і резонатора, використання бігучої акустичної хвилі, а також можливість роботи при низьких температурах нагріву, що вигідно відрізняє її від відомих аналогів. Встановлено, що збільшення діаметра ступенів до оптимального співвідношення 10:1 відносно резонатора, покращення теплоізоляції та підвищення тиску до 8 бар здатні забезпечити зростання ККД до 40 %.

Практична значущість роботи полягає у перспективі впровадження розробленого двигуна в автономні системи енергопостачання сільських і віддалених районів Республіки Казахстан, де вартість електроенергії традиційно вища, а доставка палива ускладнена. Отримані результати підтверджують можливість використання термоакустичних технологій для сталого та екологічно чистого енергопостачання.

Ключові слова: термоакустичний двигун, низькопотенційне тепло, автономне енергопостачання, енергоефективність, геотермальна енергія, двигун Стірлінга.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342027

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ СІМЕЙНОГО БУДИНКУ З РЕВЕРСИВНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ (с. 38–47)

О. О. Шавьолькін, І. О. Шведчикова, О. З. Дем'янчук, О. А. Щербаков

Об'єктом дослідження є енергетичні процеси в системі забезпечення мікроклімату сімейного будинку з реверсивним тепловим насосом при використанні математичного моделювання. В роботі здійснено вдосконалення моделі системи мікроклімату з урахуванням динаміки для отримання графіків споживання електроенергії в різних умовах. Використовувались дані розрахунку теплових параметрів будівлі. Запропоновано модель реверсивного теплового насоса за характеристиками виробника, що дозволяє оцінити споживання електричної енергії в усьому діапазоні зміни потужності і температури. Удосконалено модель системи мікроклімату будинку з тепловим насосом з урахуванням теплової інерції будівлі. Це дозволяє оцінювати в динамічних режимах температурний режим і витрати енергії при наближенні одержуваних значень електроспоживання до реальних значень. Використовувались погодинні графіки сонячної радіації і температури зовні для місця розміщення будинку, а також очікувані графіки внутрішніх надходжень тепла. Оцінювались витрати енергії і поточні значення потужності, включаючи максимальні значення. Для будинку в Києві з площею 120 м² показано, що в режимі опалення мінімальне споживання електроенергії має місце при мінімальній температурі теплоносія 35°C при COP = 3.44. Використання обраного теплового насоса в моновалентному режимі можливе до – 13°C. Можливості зниження споживання енергії при регулюванні температурного режиму є обмеженими через значне підвищення споживання ТН в динаміці. У режимі охолодження для оцінки діапазону зміни споживання енергії поряд з репрезентативними значеннями використовувалися погодинні графіки температури повітря за архівними даними. На прикладі зміни площі вікон показана можливість використання моделі для коригування параметрів будівлі для зниження енергоспоживання.

Ключові слова: тепловий насос, енергозбереження, тепловий стан будинку, теплова інерція, накопичувач енергії.