

ABSTRACT AND REFERENCES

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.355850

DETERMINATION OF CAPACITIVE CHANGE PATTERNS OF CAPACITOR EXCITER WITH VARIABLE TOPOLOGY FOR INDUCTION GENERATOR (p. 6–16)**Sviatoslav Vasylets**National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1299-8026>**Kateryna Vasylets**National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7590-0754>**Antonii Zaluzhnyi**National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2755-1040>**Volodymyr Ilchuk**National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9682-6066>**Vladyslav Hlushchuk**National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5314-669X>

The object of the study is an autonomous induction generator equipped with a capacitor exciter with a variable topology. Neglecting the influence of the generator rotor rotational frequency and load level on the required exciter capacitance, as well as the difficulties with its regulation over a wide range, leads to fluctuations in the output voltage. This is the reason for the decrease in the quality of power supply to consumers. This problem is solved by identifying the relationship between the required exciter capacitance, on the one hand, and the rotation frequency and load power, on the other. Also, by using a capacitor circuit, the topology of which can be changed, implementing different ways of connecting capacitors. The direct dependence of the required exciter capacitance value on the load power and the inverse dependence on the rotational frequency have been confirmed. The insignificant influence of the linear interaction of such factors on the required capacity has been established. The width of the fuzzy interval of coefficient at the relative power value is 0.01, for the coefficient at the rotational frequency – 0.36. This causes a significant increase in the uncertainty of estimating the required capacity as the rotational frequency increases. The possibility of maintaining the generator output voltage within the limits permitted by EN 50160 using a capacitor exciter with a variable topology has been confirmed. The exciter circuit allows to adjust the capacitance within the adjustment range according to a monotonic rising characteristic. The proposed method of controlling the capacitive excitation current allows generating an order of magnitude more current levels compared to analogues due to the use of parallel, series, and mixed connections of capacitors. The obtained results can be applied in the construction of control system for capacitor exciter with a variable topology for an autonomous induction generator.

Keywords: induction generator, voltage stabilization, fuzzy range, variable topology, capacitive exciter.

References

1. Microgrid Market (2026–2033). Grand View Research. Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microgrid-market>
2. Wind Turbine Generator Market Size & Share Analysis – Growth Trends and Forecast (2025–2030). Mordor Intelligence. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/wind-turbine-generator-market>
3. Ullah, M., Guan, Y., Yu, Y., Chaudhary, S. K., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. (2025). Dynamic Performance and Power Quality of Large-Scale Wind Power Plants: A Review on Challenges, Evolving Grid Code, and Proposed Solutions. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 6, 1148–1173. <https://doi.org/10.1109/ojpe.2025.3582012>
4. Chen, H., Zuo, Y., Chau, K. T., Zhao, W., Lee, C. H. T. (2021). Modern electric machines and drives for wind power generation: A review of opportunities and challenges. *IET Renewable Power Generation*, 15 (9), 1864–1887. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12114>
5. Induction Generators Market by Type (Grid Connected, Self Excited), Power Rating (High, Low, Medium), Cooling Type, Speed, Application, End Use – Global Forecast 2026-2032. 360iResearch. Available at: <https://www.360iresearch.com/library/intelligence/induction-generators>
6. Vasylets, S., Vasylets, K., Ilchuk, V. (2025). Determination of regulation characteristics of capacitor exciter with variable topology for self-excited induction generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (8 (134)), 17–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326178>
7. Sakkoury, K. S., Emara, S., Ahmed, M. K. (2017). Analysis of wind driven self-excited induction generator supplying isolated DC loads. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4 (1), 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.08.003>
8. Samanta, J., Chakraborty, S., Sangno, R., Pudur, R. (2025). Study of power quality issues in a renewable-driven self-excited induction generator due to different loads at edge-off grid system. *E-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100885>
9. Khan, M. F., Khan, M. R., Iqbal, A. (2022). Effects of induction machine parameters on its performance as a standalone self excited induction generator. *Energy Reports*, 8, 2302–2313. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2022.01.023>
10. Chaturvedi, Y., Kumar, S., Gupta, V. (2020). Capacitance Requirement for Rated Current and Rated Voltage Operation of SEIG Using Whale Optimization Algorithm. *Procedia Computer Science*, 167, 2581–2589. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.315>
11. Wang, Y.-J., Liu, S.-Y. (2017). Simulation of a Self-excited Three-phase Induction Generator Using the EMT/ATP. *Energy Procedia*, 138, 1029–1034. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.087>
12. Krishna, V. B. M., Duvvuri, S. S., Sobhan, P. V. S., Yadlapati, K., Sandeep, V., Narendra, B. K. (2024). Experimental study on excitation phenomena of renewable energy source driven induction generator for isolated rural community loads. *Results in Engineering*, 21, 101761. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101761>
13. Hasanova, L. (2018). Compensation of Reactive Power of Squirrel-Cage Asynchronous Generators, Used in Wind Power Plants and Small Hydroelectric Power Stations. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (30), 462–467. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.317>
14. Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., Adetokun, B. B. (2017). Optimal capacitance selection for a wind-driven self-excited reluctance generator under varying wind speed and load conditions. *Applied Energy*, 190, 339–353. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.137>

15. Chakraborty, S., Samanta, J., Pudur, R. (2024). Experimental analysis of a modified scheme for supplying single-phase remote loads from micro-hydro based three-phase self-excited induction generator. *Measurement: Sensors*, 33, 101166. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101166>
16. Chanu, L. K., Chakraborty, S., Pudur, R. (2024). Real-time analysis of voltage and frequency regulation of self-excited induction generator based micro hydro plant using generalized impedance controller. *Measurement: Sensors*, 33, 101235. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101235>
17. BS EN 50160:2022+A1:2025. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. <https://doi.org/10.3403/30431800>
18. Wu, B., Lang, Y., Zargari, N., Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118029008>
19. Arifoglu, H. (2026). VariableCapacitor. MATLAB Central File Exchange. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62850-variablecapacitor>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.355841

SUBSTANTIATING THE CRITERIA FOR SELECTING RECTIFIER DIODES FOR LOW-POWER RECTENNA ENERGY HARVESTING SYSTEMS (p. 17–28)

Vasyl Alieksiev

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3282-5985>

Dmytro Hretskykh

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2645-7872>

Dmytro Havva

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4033-7746>

Mikhail Nesterenko

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1297-9119>

Olena Ivanova

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9970-7951>

The process of rectifying electromagnetic field energy in micropower rectennas based on Schottky diodes has been investigated in this study. One of the challenges in designing such rectennas is the lack of a consistent system of quantitative criteria for selecting a rectifier diode capable of providing high conversion efficiency at ultra-low input power levels while accounting for its intrinsic and parasitic parameters. The practical relevance of this task is predetermined by the need to autonomously power Internet of Things sensors in weak electromagnetic fields.

Decomposition of loss mechanisms was performed, which made it possible to distinguish the fundamental limitations caused by the current-voltage characteristic from the frequency-dependent and parasitic diode parameters. The study was carried out using the harmonic balance method in AWR Design Environment.

The calculations showed that, in the microwatt regime, higher conversion efficiency is achieved for diodes with increased saturation current due to the dominant role of the junction threshold properties. For low-barrier structures, an increase in temperature above 50°C is accompanied by a sharp rise in reverse leakage currents, which leads to a decrease in efficiency. As the frequency increases, the junction barrier capacitance and the package parasitics increasingly limit the achievable efficiency, especially at 2.45 and 5.8 GHz.

Comparative modeling of commercial Schottky diodes revealed that, under the micropower regime, preference should be given to low-barrier structures with minimized parasitic reactances, whereas at higher input power levels the advantage may shift to structures with a medium barrier height.

Underlying the practical value of this study is the compilation of recommendations for the justified selection of components when designing battery-free power supply systems for Internet of Things sensors operating in weak electromagnetic fields.

Keywords: rectenna, RF energy harvesting, Schottky diode, impedance matching, conversion efficiency.

References

1. Tran, L.-G., Cha, H.-K., Park, W.-T. (2017). RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications. *Micro and Nano Systems Letters*, 5 (1). <https://doi.org/10.1186/s40486-017-0051-0>
2. Nikolettseas, S., Yang, Y., Georgiadis, A. (Eds.) (2016). *Wireless Power Transfer Algorithms, Technologies and Applications in Ad Hoc Communication Networks*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46810-5>
3. Shinohara, N. (2013). *Wireless Power Transfer via Radiowaves*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118863008>
4. Hemour, S., Wu, K. (2014). Radio-Frequency Rectifier for Electromagnetic Energy Harvesting: Development Path and Future Outlook. *Proceedings of the IEEE*, 102 (11), 1667–1691. <https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2358691>
5. Costanzo, A., Masotti, D. (2017). Energizing 5G: Near- and Far-Field Wireless Energy and Data Transfer as an Enabling Technology for the 5G IoT. *IEEE Microwave Magazine*, 18 (3), 125–136. <https://doi.org/10.1109/mmm.2017.2664001>
6. Valenta, C. R., Durgin, G. D. (2014). Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Microwave Magazine*, 15 (4), 108–120. <https://doi.org/10.1109/mmm.2014.2309499>
7. Zhang, Z., Pang, H., Georgiadis, A., Cecati, C. (2019). Wireless Power Transfer – An Overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66 (2), 1044–1058. <https://doi.org/10.1109/tie.2018.2835378>
8. Popovic, Z. (2017). Near- and far-field wireless power transfer. 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS), 3–6. <https://doi.org/10.1109/telsks.2017.8246215>
9. Gu, X., Hemour, S., Wu, K. (2022). Far-Field Wireless Power Harvesting: Nonlinear Modeling, Rectenna Design, and Emerging Applications. *Proceedings of the IEEE*, 110 (1), 56–73. <https://doi.org/10.1109/jproc.2021.3127930>
10. Smith, D. R., Gowda, V. R., Yurduseven, O., Larouche, S., Lipworth, G., Urzhumov, Y., Reynolds, M. S. (2017). An analysis of beamed wireless power transfer in the Fresnel zone using a dynamic, metasurface aperture. *Journal of Applied Physics*, 121 (1). <https://doi.org/10.1063/1.4973345>
11. Fowler, C., Silva, S., Thapa, G., Zhou, J. (2022). High efficiency ambient RF energy harvesting by a metamaterial perfect absorber. *Optical Materials Express*, 12 (3), 1242. <https://doi.org/10.1364/ome.449494>
12. Visser, H. J., Vullers, R. J. M. (2013). RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements. *Proceedings of the IEEE*, 101 (6), 1410–1423. <https://doi.org/10.1109/jproc.2013.2250891>
13. Pinuela, M., Mitcheson, P. D., Lucyszyn, S. (2013). Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61 (7), 2715–2726. <https://doi.org/10.1109/tmmt.2013.2262687>
14. Saito, K., Nishiyama, E., Toyoda, I. (2022). A 2.45- and 5.8-GHz Dual-Band Stacked Differential Rectenna With High Conversion Efficiency in Low Power Density Environment. *IEEE Open Journal*

- of Antennas and Propagation, 3, 627–636. <https://doi.org/10.1109/ojap.2022.3171035>
15. Chandravanshi, S., Sarma, S. S., Akhtar, M. J. (2018). Design of Triple Band Differential Rectenna for RF Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66 (6), 2716–2726. <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2819699>
 16. Contreras, A., Urdaneta, M. (2021). Analysis of Variance of the Diode Parameters in Multiband Rectifiers for RF Energy Harvesting. *Radio-engineering*, 30 (1), 150–156. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0150>
 17. Paz, H. P. D., Silva, V. S. D., Diniz, R., Trevisoli, R., Capovilla, C. E., Casella, I. R. S. (2023). Temperature Analysis of Schottky Diodes Rectifiers for Low-Power RF Energy Harvesting Applications. *IEEE Access*, 11, 54122–54132. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3281794>
 18. Sze, S. M., Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
 19. Maas, S. A. (2003). *Nonlinear Microwave and RF Circuits*. Boston: Artech House, 608. Available at: <https://us.artechhouse.com/Nonlinear-Microwave-and-RF-Circuits-Second-Edition-P1097.aspx>
 20. Quarles, T., Newton, A. R., Pederson, D. O., Sangiovanni-Vincentelli, A. (1993). *SPICE3 Version 3f3 User's Manual*. Berkeley, 145. Available at: http://www.gianlucafiore.org/appunti/Spice_3f3_Users_Manual.pdf
 21. Gretsikh, D. V., Luchaninov, A. I., Vishniakova, J. V., Katrich, V. A., Nesterenko, M. V. (2018). Electrodynamical Model of a Wireless Power Transmission System. 2018 XXIIIrd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 80–85. <https://doi.org/10.1109/diped.2018.8543290>
 22. Luchaninov, A. I., Gretsikh, D. V., Gomozov, A. V., Katrich, V. A., Nesterenko, M. V. (2019). Electrodynamical Approach to Designing WPT Systems with Accounting for Non-system Interactions. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 107–111. <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879788>
 23. Gretsikh, D., Luchaninov, A., Katrich, V., Nesterenko, M. (2019). Electrodynamical Approach to Designing Wireless Power Transfer Systems (Internal System Processes). 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ukrmico47782.2019.9165536>
 24. Gretsikh, D., Luchaninov, A., Katrich, V., Nesterenko, M., Gomozov, A. (2019). External Parameters of Wireless Power Transmission Systems. 2019 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 117–121. <https://doi.org/10.1109/diped.2019.8882592>
 25. Alieksieiev, V., Gretsikh, D., Luchaninov, A., Lykhograi, V., Shcherbina, A. (2021). Applying the Electrodynamical Approach to Modeling Wireless Power Transmission Systems. 2021 IEEE 26th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), 111–115. <https://doi.org/10.1109/diped53165.2021.9552254>
 26. AWR Design Environment Platform (2026). Cadence Design Systems. Available at: https://www.cadence.com/en_US/home.html
 27. Roberg, M., Falkenstein, E., Popovic, Z. (2012). High-efficiency harmonically-terminated rectifier for wireless powering applications. 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1–3. <https://doi.org/10.1109/mwsym.2012.6259641>
 28. Nelder, J. A., Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, 7 (4), 308–313. <https://doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
 29. The Zero Bias Schottky Detector Diode: Application Note 969. San Avago Technologies, 6. Available at: [https://people.ee.ethz.ch/~mzahner/PPS-EMrad/material/literature/RF-Detectors_Receivers/The%20Zero%20Bias%20Schottky%20Detector%20Diode%20\(Avago%20AN%20969\).pdf](https://people.ee.ethz.ch/~mzahner/PPS-EMrad/material/literature/RF-Detectors_Receivers/The%20Zero%20Bias%20Schottky%20Detector%20Diode%20(Avago%20AN%20969).pdf)
 30. SMS7630 Series. Surface Mount Mixer and Detector Schottky Diodes. Available at: <https://www.skyworksinc.com/Products/Diodes/SMS7630-Series>
 31. El Mattar, S., Baghdad, A., Ballouk, A. (2022). A 2.45/5.8 GHz high-efficiency dual-band rectifier for low radio frequency input power. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 12 (3), 2169. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2169-2176>
 32. Bhatt, K., Kumar, S., Kumar, P., Tripathi, C. C. (2019). Highly Efficient 2.4 and 5.8 GHz Dual-Band Rectenna for Energy Harvesting Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18 (12), 2637–2641. <https://doi.org/10.1109/lawp.2019.2946911>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351680

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF PARALLEL PUMP UNITS USING THE COVARIANCE MATRIX ADAPTATION EVOLUTION STRATEGY (p. 29–40)

Yuliya Bulatbayeva

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3900-5568>

Rauan Kossymbayev

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5439-7267>

Victoria Tsyapkina

Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4252-3216>

Vera Ivanova

Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6315-5291>

Felix Bulatbayev

Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Karaganda, Republic of Kazakhstan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-1189>

The object of the study is a pumping station with four parallel-connected centrifugal pump units driven by asynchronous electric motors. The problem to be solved is that modern stations, partially equipped with variable frequency drive (VFDs), allow only maintaining the head without observing allowable modes, failing to ensure reliability and energy efficiency. This leads to rapid wear and efficiency reduction. The solution lies in optimizing energy consumption and keeping operating points within the POR (preferred operating region), to prevent accelerated wear.

The essence of the results obtained lies in the development of a method for energy-efficient control based on the CMA-ES strategy integrated with a model in MATLAB (California, USA). Experiments showed that the balanced strategy reduces energy consumption by 7% while maintaining equipment in the POR zone for 95.8% of the time. Comparative analysis showed that a configuration with two VFDs is a rational compromise, limiting energy overconsumption to 25% relative to systems fully equipped with VFDs.

These results allowed to solve the specified problem due to the introduction of a block performing an analytical express assessment of the required number of units based on affinity laws, using adaptive penalty functions and CMA-ES tuning. This allowed excluding combinatorial enumeration and reducing the search time for the optimal solution to 60–80 seconds, ensuring speed unavailable to standard genetic algorithms.

The conditions under which they can be used on practice involve the application of the developed method as a supervisory control (SCADA) for water supply pumping stations to generate control

setpoints with a periodicity of 1–2 minutes without the need for complete equipment replacement.

Keywords: parallel pump units, variable frequency drive, energy efficiency, optimization, CMA-ES, constraint handling, MATLAB.

References

- Electric Motor Systems Annex Overview 2019-2024. EMSA. Available at: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2022/06/EMSA_Policy_Brief_0_updated_2022.pdf
- van Werkhoven, M., Werle, R. (2016). Policy Guidelines for Motor Driven Units. 4E Executive Committee. Available at: https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2020/12/PGmdu_oct2016.pdf
- Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems (2011). International Energy Agency (IEA). Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/d69b2a76-feb9-4a74-a921-2490a8fefcdf/EE_for_ElectricSystems.pdf
- de Almeida, A. T., Ferreira, F. J. T. E., Fong, J. (2023). Perspectives on Electric Motor Market Transformation for a Net Zero Carbon Economy. *Energies*, 16 (3), 1248. <https://doi.org/10.3390/en16031248>
- Zdor, G. N., Sinitsyn, A. V., Avrutin, O. A. (2017). Pump group automatic control for reducing its energy consumption. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 54–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66>
- SINAMICS G120X converter. Operating Instructions (2021). Siemens. Available at: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/512/109801512/att_1078791/v1/G120X_op_instr_0621_en-US.pdf
- Altivar Process ATV600. Programming Manual (2025). Schneider Electric. Available at: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=EAV64318&p_enDocType=User+guide&p_File_Name=ATV600_Programming_Manual_EN_EAV64318_13.pdf
- Barbul, M. L., Staroverov, S. V. (2018). Method for controlling multi-pump stations considering current water consumption. *The Eurasian Scientific Journal*, 5 (10).
- Elovik, V. L. (2019). Calculation and analyses methodology of the working conditions of pumping units, equipped with adjustable drive. *Trudy BGTU*, 2 (2), 204–213.
- Voitov, I., Yalovik, V. (2022). Modern methods for calculation and analysis of the operating modes of centrifugal pumps with variable drive as a part of water supply and water drainage systems. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*, 31 (8), 2–9. <https://doi.org/10.52928/2070-1683-2022-31-8-2-9>
- Koor, M., Vassiljev, A., Koppel, T. (2014). Optimal Pump Count Prediction Algorithm for Identical Pumps Working in Parallel Mode. *Procedia Engineering*, 70, 951–958. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.106>
- Wu, P., Lai, Z., Wu, D., Wang, L. (2015). Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141 (8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000493](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000493)
- Olszewski, P. (2016). Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps. *Applied Energy*, 178, 527–539. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.084>
- Olszewski, P., Arafeh, J. (2018). Parametric analysis of pumping station with parallel-configured centrifugal pumps towards self-learning applications. *Applied Energy*, 231, 1146–1158. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.173>
- Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V. (2021). Increasing Service Life and System Efficiency of Parallel Pumps Using Combined Pump Regulation. *Water*, 13 (13), 1808. <https://doi.org/10.3390/w13131808>
- Gao, Q., Xue, J., Yan, H. (2022). Optimization Analysis of Full Life Cycle Energy Efficiency Multi-Objective Parallel Pump Sets. *IEEE Access*, 10, 105578–105588. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3209381>
- Qin, X., Luo, Y., Chen, S., Chen, Y., Han, Y. (2022). Investigation of Energy-Saving Strategy for Parallel Variable Frequency Pump System Based on Improved Differential Evolution Algorithm. *Energies*, 15 (15), 5360. <https://doi.org/10.3390/en15155360>
- Sun, X., Feng, X. (2024). Application of intelligent algorithms in optimal operation of pumping stations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2854 (1), 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2854/1/012044>
- Hansen, N. (2016). The CMA Evolution Strategy: A Tutorial. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.00772>
- Usachev, A. P. (2018). Metodika otsenki effektivnosti chastotnogo regulirovaniya proizvoditelnosti nasosnykh agregatov. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 7, 57–63.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358842

IMPROVEMENT OF THERMAL PERFORMANCE OF AN INDIRECT FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR IN SOLAR WATER HEATER APPLICATIONS (p. 41–49)

Mochamad Sugiri

Universitas Pancasila, DKI Jakarta, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4040-3539>

Budhi M Suyitno

Universitas Pancasila, DKI Jakarta, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4384-0352>

Erlanda Augupta Pane

Universitas Pancasila, DKI Jakarta, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5354-3821>

Gunadi Haryanto

Universitas Pancasila, DKI Jakarta, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2031-9514>

Ismail

Universitas Pancasila, DKI Jakarta, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7911-4163>

The object in this study is the process of heat transfer, energy conversion, and heat distribution through solar collectors in indirect systems. The problem to be solved is to develop sustainable alternatives powered by renewable energy sources, such as solar energy

This study is focused on the research of a solar water heater (SWH) system incorporating flat plate solar collectors (FPSC). The system enhances the thermal performance of the FPSC through an indirect, closed-loop configuration. Water from the hot water tank (HWT) is circulated through the FPSC copper pipes by a pump powered by a Solar Power Plant, ensuring continuous heat transfer and efficient thermal performance. The system operates at a flow rate of 0.116 kg/s. A K-type thermocouple connected to a data logger records the water temperatures at the HWT's inlet and outlet every 30 seconds. In addition to the system, the features of this study also focuses on phase change material (PCM) which uses mannitol material as thermal energy storage (TES) which will be used during cloudy or rainy weather. All equipment such as plunger pumps, heaters for PCM use solar electricity. The feature of this study also uses the Internet of Things (IoT) to find out the temperature in the solar water heater tank. The test results indicate a maximum FPSC thermal efficiency of 72% and a coefficient of performance (COP) of 10 under a pump power of 100 W and an absorbed heat input of 1000 W. The average solar irradiance ranged from 850 to 950 W/m². These results demonstrate the potential of this technology to efficiently meet domestic hot-water demand and its suitability for deployment in tropical regions.

Keywords: solar collector, water tank, indirect system, power plant, water heater.

References

1. Syahbana, M. S. L., Kurniawan, Y., Ismail, I. (2024). Experimental Study on the Effect of Different HTF Discharges to Increase Efficiency of a Latent Heat Storage System Using a Spiral Coil Heat Exchanger with Different Fins. *International Journal of Thermophysics*, 45 (6). <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03373-9>
2. Waluyo, J., Dhewangga Putra, R. D., Chandra Adhitya, D., Rahman, R. A. (2025). Parametric operational analysis of hybrid thermo-electric/fluid-active thermal storage for domestic water heating system. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 286, 113575. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113575>
3. Gunjo, D. G., Mahanta, P., Robi, P. S. (2017). CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition. *Renewable Energy*, 106, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.041>
4. Salman, B., Sanaa Hassan Obaid. (2025). Enhanced Performance of Flat Plate Solar Collector with Twisted Tape Double Cutting Rectangle Shape. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 29 (1), 68–78. <https://doi.org/10.31272/jeasd.3128>
5. Pambudi, N. A., Nanda, I. R., Putri, A. E., Salsala, R. N., Aziz, M., Rudiyanto, B., Wiyono, A. (2024). An experimental investigation of various trickle collector structures to enhance solar water heater efficiency. *Cleaner Engineering and Technology*, 21, 100789. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100789>
6. Naveenkumar, R., Venkateshkumar, R., Mohanavel, V., Franklin, C., Ismail, S. O., Ravichandran, M. et al. (2025). Recent developments in solar water heaters and solar collectors: A review on experimental and neural network analyses. *Results in Engineering*, 25, 104394. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104394>
7. Alwan, N. T., Majeed, M. H., Khudhur, I. M., Shcheklein, S. E., Ali, O. M., Yaqoob, S. J., Alayi, R. (2022). Assessment of the performance of solar water heater: an experimental and theoretical investigation. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 528–539. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac032>
8. Dhairiyasamy, R., Rajendran, S., Khan, S. A., Aziz Alahmadi, A., Alwetaishi, M., Ağbulut, Ü. (2024). Enhancing thermal efficiency in flat plate solar collectors through internal barrier optimization. *Thermal Science and Engineering Progress*, 54, 102856. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102856>
9. Amirgaliyev, Y., Kunelbayev, M., Kalizhanova, A., Amirgaliyev, B., Kozbakova, A., Auelbekov, O., Kataev, N. (2019). Study of convective heat transfer in flat plate solar collectors. *ITM Web of Conferences*, 24, 1009. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192401009>
10. Lin, X., Xia, Y., Cheng, Z., Liu, X., Fu, Y., Li, L., Zhou, W. (2024). Thermal Performance Analysis of Porous Foam-Assisted Flat-Plate Solar Collectors with Nanofluids. *Sustainability*, 16 (2), 693. <https://doi.org/10.3390/su16020693>
11. Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Aljibori, H. S., Mohammed, H. I., Mahdi, A. J., Al-Rubaye, A. H. et al. (2025). Recent advancement in hybrid nanofluids used in flat plate solar collectors and future prospects. *Ministry of Science and Technology, Vietnam*, 67 (1). <https://doi.org/10.31276/vjste.2024.0065>
12. Abduljleel, M. A., Yasin, N. J., Ghadhban, S. A., Soomro, S. A. (2024). Performance Improving for the Flat Plate Solar Collectors by Using Nanofluids: Review Study. *Journal of Techniques*, 6 (1), 52–68. <https://doi.org/10.51173/jt.v6i1.1891>
13. Taupek, M. M. M., Awang, M., Ruddin, N. M. B., Hamidon, N., Ahmad, F., Lukiyanto, K. (2025). Performance Evaluation of Energy Collection Using Various Solar Flat Plate Collectors. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, IX (I), 4209–4220. <https://doi.org/10.47772/ijriss.2025.9010328>
14. Kadam, T. V., Pakhare, S. Y., Godse, A. B. (2025). Performance analysis of solar thermal collectors: A comprehensive review. *Measurement: Energy*, 7, 100059. <https://doi.org/10.1016/j.meae.2025.100059>
15. Suyitno, B. M., Ismail, Rahman, R. A. (2023). Improving the performance of a small-scale cascade latent heat storage system by using gradual melting temperature storage tank. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 103034. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103034>
16. Chekerovska, M., Filkoski, R. (2015). Efficiency of liquid flat-plate solar energy collector with solar tracking system. *Thermal Science*, 19 (5), 1673–1684. <https://doi.org/10.2298/tsci150427099c>
17. Anshori Hasibuan, A. I., Nurdin, R., Ismail, I., Rahman, R. A. (2025). Experimental evaluation of hybrid electric-heat operation for reliable residential water heating technology using photo-thermal system. *Journal of Thermal Engineering*, 11 (6), 1717–1728. <https://doi.org/10.14744/thermal.0001027>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.355850

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРНОГО ЗБУДЖУВАЧА ЗІ ЗМІННОЮ ТОПОЛОГІЄЮ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА (с. 6–16)

С. В. Василюк, К. С. Василюк, А. Л. Залужний, В. В. Льчук, В. С. Глушук

Об'єктом дослідження є автономний асинхронний генератор, обладнаний конденсаторним збуджувачем зі змінною топологією. Нехтування впливу частоти обертання ротора та рівня навантаження на необхідну ємність збуджувача, а також складності із її регулюванням у широкому діапазоні, призводять до коливань вихідної напруги. Це є причиною зниження якості електропостачання споживачів. Така проблема вирішена за рахунок виявлення взаємозв'язку необхідної ємності збуджувача з частотою обертання та потужністю навантаження та застосуванням конденсаторної схеми, топологія якої може змінюватися, реалізуючи різні способи з'єднання конденсаторів. Підтверджено пряму залежність необхідної величини ємності збуджувача від потужності навантаження і обернено – від частоти обертання. Встановлено незначимість впливу лінійної взаємодії таких факторів на необхідну ємність. Ширина нечіткого інтервалу коефіцієнта при відносному значенні потужності становить 0,01, для коефіцієнта при частоті обертання – 0,36. Це обумовлює суттєве збільшення невизначеності оцінювання величини необхідної ємності при підвищенні частоти. Підтверджено можливість підтримання вихідної напруги генератора у допустимих за EN 50160 межах за допомогою конденсаторного збуджувача зі змінною топологією. Схема збуджувача дозволяє регулювати ємність відповідно до монотонної висхідної характеристики. Запропонований метод керування ємнісним струмом збудження дозволяє формувати на порядок більше рівнів струму порівняно з аналогами завдяки використанню паралельного, послідовного та змішаного з'єднання конденсаторів. Отримані результати можуть бути застосовані при побудові системи керування конденсаторним збуджувачем зі змінною топологією для автономного асинхронного генератора.

Ключові слова: асинхронний генератор, стабілізація напруги, нечіткий діапазон, змінна топологія, ємнісний збуджувач.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.355841

ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ВИБОРУ ВИПРЯМНИХ ДІОДІВ ДЛЯ МІКРОПОТУЖНИХ РЕКТЕН СИСТЕМ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ (с. 17–28)

В. О. Алексеев, Д. В. Грецьких, Д. С. Гавва, М. В. Нестеренко, О. О. Иванова

Об'єктом дослідження є процес випрямлення енергії електромагнітного поля в мікропотужних ректенах на діодах Шотткі. Однією з проблем проектування таких ректен є відсутність узгодженої системи кількісних критеріїв вибору випрямного діода для забезпечення високого ККД за наднизьких рівнів вхідної потужності з урахуванням його електрофізичних і паразитних параметрів. Практична значущість цієї задачі зумовлена потребою автономного живлення датчиків Інтернету речей у слабких електромагнітних полях. Виконано декомпозицію механізмів втрат, що дозволило відокремити фундаментальні обмеження, зумовлені вольт-амперною характеристикою, від частотно-залежних та паразитних параметрів діода. Дослідження виконано методом гармонічного балансу в AWR Design Environment. Розрахунки показали, що у мікровоатному режимі вищі значення ККД досягаються для діодів з підвищеним струмом насичення через домінування порогових властивостей переходу. Для низькобар'єрних структур підвищення температури понад 50°C супроводжується різким зростанням зворотних струмів витоку, що зумовлює падіння ККД. Зі зростанням частоти бар'єрна ємність переходу та паразитні параметри корпусу дедалі сильніше обмежують досяжний ККД, особливо на частотах 2,45 та 5,8 ГГц. Порівняльне моделювання комерційних діодів Шотткі показало, що в мікропотужному режимі доцільно орієнтуватися на низькобар'єрні структури з мінімізованими паразитними реактивностями, тоді як за вищих рівнів вхідної потужності перевага може переходити до структур із середньою висотою бар'єра. Практична цінність роботи полягає у розробці рекомендацій для обґрунтованого вибору елементної бази під час проектування систем безбатарейного живлення датчиків Інтернету речей у слабких електромагнітних полях.

Ключові слова: ректена, збір енергії, діод Шотткі, узгодження імпедансів, ефективність перетворення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.351680

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМИ НАСОСНИМИ АГРЕГАТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СТРАТЕГІЇ ЕВОЛЮЦІЇ АДАПТАЦІЇ КОВАРІАЦІЙНОЇ МАТРИЦІ (с. 29–40)

Yuliya Bulatbayeva, Rauan Kossymbayev, Victoria Tsyapkina, Vera Ivanova, Felix Bulatbayev

Об'єктом дослідження є насосна станція з чотирма паралельно з'єднаними відцентровими насосними агрегатами, що приводяться в дію асинхронними електродвигунами. Вирішувана проблема полягає у тому, що сучасні станції, частково оснащені ПЧ (перетворювач частоти), дозволяють лише підтримувати напір без дотримання допустимих режимів, не забезпечуючи надійність та енергоефективність. Це призводить до швидкого зносу обладнання та зниження коефіцієнту корисної дії (ККД). Рішення полягає в оптимізації енергоспоживання та утриманні робочих точок у зоні POR (preferred operating region) для запобігання прискореному зносу.

Суть отриманих результатів полягає у розробці та обґрунтуванні методу енергоефективного управління на базі стратегії CMA-ES, інтегрованої з моделлю в MATLAB (Каліфорнія, США). Експерименти показали, що збалансована стратегія знижує енергоспоживання на 7% при утриманні обладнання в зоні POR протягом 95,8% часу. Порівняльний аналіз показав, що конфігурація з двома ПЧ є раціональним компромісом, обмежуючи перевитрату енергії на рівні 25% відносно систем, повністю оснащених ПЧ.

Ці результати дозволили вирішити вказану проблему завдяки впровадженню блоку, що виконує аналітичну експрес-оцінку необхідного складу агрегатів на основі законів подібності, використанню адаптивних штрафних функцій та налаштуванню CMA-ES.

Це дозволило виключити комбінаторний перебір та скоротити час пошуку оптимального рішення до 60–80 секунд, забезпечивши швидкістю, недоступну стандартним генетичним алгоритмам.

Умови, за яких вони можуть бути використані на практиці, передбачають застосування розробленого методу як системи supervisory управління (SCADA) насосними станціями водопостачання для генерації уставок управління з періодичністю 1–2 хвилини без необхідності повної заміни обладнання.

Ключові слова: паралельні насосні агрегати, перетворювач частоти, енергоефективність, оптимізація, CMA-ES, обробка обмежень, MATLAB.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358842

ПОКРАЩЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПРЯМОГО ПЛОСКОГО СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА В ЗАСТОСУВАННІ СОНЯЧНИХ ВОДОНАГРІВАЧІВ (с. 41–49)

Mochamad Sugiri, Budhi M Suyitno, Erlanda Augupta Pane, Gunadi Haryanto, Ismail

Об'єктом цього дослідження є процес теплопередачі, перетворення енергії та розподілу тепла через сонячні колектори в непрямим системах.

Проблема, яку необхідно вирішити, полягає в розробці стійких альтернатив, що працюють на відновлюваних джерелах енергії, таких як сонячна енергія. Досліджувалась система сонячного водонагрівача (SWH), що включає плоскі сонячні колектори (FPSC). Система покращує теплову продуктивність FPSC завдяки непрямій конфігурації замкнутого циклу. Вода з резервуара для гарячої води (HWT) циркулює через мідні труби FPSC за допомогою насоса, що живиться від сонячної електростанції, забезпечуючи безперервну передачу тепла та ефективну теплову продуктивність. Система працює зі швидкістю потоку 0,116 кг/с. Термопара типу K, підключена до реєстратора даних, реєструє температуру води на вході та виході HWT кожні 30 секунд. Окрім системи, особливість цього дослідження також зосереджена на матеріалі з фазовим переходом (PCM), який використовує маніт як акумулятор теплової енергії (TES), що буде використовуватися в хмарну або дощову погоду. Усе обладнання, таке як плунжерні насоси, нагрівачі для PCM, використовує сонячну електроенергію. Особливістю цього дослідження також є використання Інтернету речей (IoT) для визначення температури в баку сонячного водонагрівача. Результати випробувань показують максимальну теплову ефективність FPSC 72% та коефіцієнт продуктивності (COP) 10 при потужності насоса 100 Вт та поглиненій тепловій потужності 1000 Вт. Середня сонячна радіація коливалася від 850 до 950 Вт/м². Ці результати демонструють потенціал цієї технології для ефективного задоволення потреб у гарячій воді для побутових потреб та її придатність для впровадження в тропічних регіонах.

Ключові слова: сонячний колектор, бак для води, непрямая система, електростанція, водонагрівач.