

## ABSTRACT AND REFERENCES

## ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364241**  
**DETERMINING TRANSIENT PATTERNS IN**  
**PARALLEL-CONNECTED TRANSFORMERS OF**  
**DIFFERENT CAPACITIES (p. 6–14)**

**Anatoliy Panchenko**

Ivan Kozhedub Kharkiv National  
 Air Force University, Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1280-2049>

**Iryna Boklah**

Ivan Kozhedub Kharkiv National  
 Air Force University, Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0013-5808>

**Yulia Musairova**

Ivan Kozhedub Kharkiv National  
 Air Force University, Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7188-2085>

**Volodymyr Honcharov**

Ivan Kozhedub Kharkiv National  
 Air Force University, Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2595-3380>

**Nadia Kuravska**

Ivan Kozhedub Kharkiv National  
 Air Force University, Kharkiv, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7755-2899>

This study investigates transient processes and current distribution in parallel-connected transformers on a common load. The task addressed relates to the fact that the mathematical description of processes is performed in instantaneous current values, in which the parameters used are widely known on the one hand while rarely used in practice on the other. This approach allows a single system of differential equations to describe most operating modes of transformers, as well as transitions between them at the same time. That, in turn, makes it possible to obtain separate instantaneous values of currents for each transformer and the balancing current between them. That is, to control the load distribution between transformers, energy losses, both under steady-state and transient modes. It is almost impossible to acquire such data with control and measuring equipment.

This work proves that the ratio of active and reactive components of the windings should also be taken into account. Short-circuit voltages can be the same while the ratio between active and reactive resistances of the windings can be different. And this affects the transient processes and the balancing current. Such results were achieved by compiling differential equations of parallel-connected transformers and the load.

It was established that the total duration of transients decreases when transformers are connected in parallel. At the same time, the duration of transients of the balancing current does not depend on the load at all but only on the parameters of the transformer and on the moment of switching.

The studies were conducted on transformers TM-180/10 and TM-530/10; it was confirmed that the balancing currents take small values, compared to the load currents, but they are on the same order of magnitude as the magnetizing currents and can distort the magnetizing curve, which provokes higher harmonics. For the specified transformers, the duration of transients on the balancing currents, under certain conditions, was more than 1 second, and when a short circuit occurs on the common buses, more than 2 seconds.

This study showed that it is possible to measure most of the parameters for the specified system of equations on a real transformer. It also becomes possible to calculate them according to the specifications and compare the operation of the models under different modes. This could allow a more objective assessment of the technical condition of the transformer.

**Keywords:** transformer inductance, transient processes, current distribution, balancing current, operating modes.

#### References

- Jaramillo-Duque, Á., Muñoz-Galeano, N., Ortiz-Castrillón, J., López-Lezama, J., Albarracín-Sánchez, R. (2018). Power Loss Minimization for Transformers Connected in Parallel with Taps Based on Power Chargeability Balance. *Energies*, 11 (2), 439. <https://doi.org/10.3390/en11020439>
- Wang, T., Chen, K., Hu, X., Zhang, L., Ye, P. (2023). Theory and simulation analysis of parallel operation after main transformer replacement. *Journal of Physics: Conference Series*, 2591 (1), 12030. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2591/1/012030>
- Kucukkaya, B. B. (2024). Theoretical and practical analysis of parallel operating conditions of two transformers with different relative short circuit voltages. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences – Sigma Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 701–713. <https://doi.org/10.14744/sigma.2023.00025>
- Mehta, V. K., Mehta, R. (2006). *S Chand Basic Electrical Engineering*. S. Chand Publishing.
- Zhang, P., Wang, Y., Lan, S., Zhang, H., Zhang, D., Liang, J. (2020). The Simulation Analysis on the Transient Process of Transformer. *Journal of Physics: Conference Series*, 1650 (3), 32056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1650/3/032056>
- Baron, B., Kolańska-Pluska, J., Lukaniszyn, M., Spalek, D., Kraszewski, T. (2022). Solution of nonlinear stiff differential equations for a three-phase no-load transformer using a Runge–Kutta implicit method. *Archives of Electrical Engineering*, 71 (4), 1081–1106. <https://doi.org/10.24425/ae.2022.142126>
- Quan, F., Chen, J., Liu, Y., Wang, Y., He, W., Wen, X. (2017). Calculation and Analysis of Transformer Transient Over-Voltage in no-Load Switching. *Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Advances in Materials, Mechatronics and Civil Engineering (ICAMMCE 2017)*. <https://doi.org/10.2991/icammce-17.2017.1>
- Bjelić, S., Bogičević, Z. (2013). Computer Simulation of Theoretical Model of Electromagnetic Transient Processes in Power Transformers. *International Journal of Information Technology and Computer Science*, 6 (1), 1–12. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2014.01.01>
- Trebolle, D., Valecillos, B. (2024). Optimal operation of paralleled power transformers. *RE&PQJ*, 6 (1). <https://doi.org/10.24084/repqj06.392>
- Khomenko, I. V., Berezka, S. K., Poliakov, I. V. (2016). Analysis of optimum operating modes of power transformers under operating conditions. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 6, 70–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.6.12>
- Jurković, M., Žarko, D. (2022). Calculation of current distribution in parallel-connected transformer winding sections in the case of asymmetric magnetic field during short-circuit test. *Electric Power Systems Research*, 210, 108141. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108141>
- Saied, M. M. (2001). A study on the inrush current phenomena in transformer substations. *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, 2, 1180–1187. <https://doi.org/10.1109/ias.2001.955643>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.365476**  
**IMPROVING THE STRATEGY FOR USING RECHARGEABLE BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS TO ENHANCE THE ECONOMIC EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN THE ELECTRICITY MARKET (p. 15–27)**

**Volodymyr Kulyk**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7594-5661>

**Maksym Zatkhei**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5480-5187>

**Vira Teptia**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2792-0160>

**Yurii Hrytsiuk**

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6463-3910>

**Sviatoslav Vishnevskiy**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2159-603X>

**Iryna Hrytsiuk**

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4472-306X>

This study investigates operational process involving rechargeable battery energy storage systems (ESSs) in a combination with photovoltaic power plants (PVPPs) in the competitive electricity market. The task addressed is to improve the functioning efficiency of electric power systems with deep PVPP penetration. This work analyzes scenarios and strategy optimization when using ESSs to increase the economic efficiency of PVPPs operating in a single complex. The research results established those factors that affect the technical and economic indicators of ESS application and helped define a combined management strategy.

Practical ESS management scenarios with different mechanisms for forming an economic effect were studied, in particular, the day-ahead market arbitrage scenario (DAM) and the PVPP balancing scenario. The latter, in addition to minimizing the costs of settling imbalances, provides for the sale of excess stored energy during hours of maximum price.

The use of an ensemble of machine learning methods (Random-Forest + XGBoost + LightGBM) has made it possible to achieve high accuracy in forecasting PVPP generation. Energy indicators were optimized for each scenario of ESS control system; financial results were assessed based on the MILP and MPC methods. That made it possible to quantitatively compare the effectiveness of the arbitrage and balancing strategies and justify the choice of ESS operation mode depending on the volatility of the DAM prices, the level of forecast uncertainty of generation, and the current rules for regulating imbalances in the electricity market.

The results were verified on the example of a real 9.5 MW PVPP, supplemented by ESS with an energy capacity of 2 MWh, which made it possible to take into account the financial responsibility of the producer for imbalances and the impact of price asymmetry on the end result.

**Keywords:** photovoltaic power plant, electricity storage system, electricity market, optimization of operation.

## References

- Pro zatverdzhennia Pravyl rynku. Postanova 14.03.2018 No. 307. Natsionalna komisiya, shcho zdiysniuie derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text>
- Pedro, H. T. C., Coimbra, C. F. M. (2012). Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs. *Solar Energy*, 86 (7), 2017–2028. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.004>
- Voyant, C., Notton, G., Kalogirou, S., Nivet, M.-L., Paoli, C., Motte, F., Fouilloy, A. (2017). Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy*, 105, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>
- Yang, D., Kleissl, J., Gueymard, C. A., Pedro, H. T. C., Coimbra, C. F. M. (2018). History and trends in solar irradiance and PV power forecasting: A preliminary assessment and review using text mining. *Solar Energy*, 168, 60–101. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.023>
- Fountoulakis, I., Kosmopoulos, P., Papachristopoulou, K., Raptis, I.-P., Mamouri, R.-E., Nisantzi, A. et al. (2021). Effects of Aerosols and Clouds on the Levels of Surface Solar Radiation and Solar Energy in Cyprus. *Remote Sensing*, 13 (12), 2319. <https://doi.org/10.3390/rs13122319>
- Poliukhov, A., Gvozdeva, A., Piskunova, D. (2026). The influence of CAMS aerosol climatology on shortwave irradiance and temperature forecasts in the ICON NWP model verified against observational data. *Atmospheric Research*, 338, 109025. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2026.109025>
- Skoplaki, E., Palyvos, J. A. (2009). Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*, 34 (1), 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.009>
- Jordan, D. C., Kurtz, S. R. (2012). Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review. National Renewable Energy Laboratory. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51664.pdf>
- Cole, W., Frazier, A., Augustine, C. (2021). Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage: 2021. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1786976>
- Akrami, E., Ameri, M., Rocco, M. V., Sanvito, F. D., Colombo, E. (2020). Thermodynamic and exergo-economic analyses of an innovative semi self-feeding energy system synchronized with waste-to-energy technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100759. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100759>
- Batteries and Secure Energy Transitions (2024). IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>
- Baumgarte, F., Glenk, G., Rieger, A. (2020). Business Models and Profitability of Energy Storage. *iScience*, 23 (10), 101554. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101554>
- Inman, R. H., Pedro, H. T. C., Coimbra, C. F. M. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39 (6), 535–576. <https://doi.org/10.1016/j.pecc.2013.06.002>
- Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., Schmutz, N. (2013). Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.042>
- Antonanzas, J., Osorio, N., Escobar, R., Urraca, R., Martinez-de-Pison, F. J., Antonanzas-Torres, F. (2016). Review of photovoltaic power forecasting. *Solar Energy*, 136, 78–111. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.069>
- Denholm, P., Jorgenson, J., Hummon, M., Jenkin, T., Palchak, D., Kirby, B. et al. (2013). The Value of Energy Storage for Grid Applications. National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1220050>
- Staffell, I., Rustomji, M. (2016). Maximising the value of electricity storage. *Journal of Energy Storage*, 8, 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.08.010>
- Hesse, H., Schimpe, M., Kucevic, D., Jossen, A. (2017). Lithium-Ion Battery Storage for the Grid – A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. *Energies*, 10 (12), 2107. <https://doi.org/10.3390/en10122107>

19. Parra, D., Gillott, M., Norman, S. A., Walker, G. S. (2015). Optimum community energy storage system for PV energy time-shift. *Applied Energy*, 137, 576–587. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.060>
20. Zhang, Y., Wang, J., Wang, X. (2014). Review on probabilistic forecasting of wind power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.033>
21. Burger, S., Chaves-Ávila, J. P., Batlle, C., Pérez-Arriaga, I. J. (2017). A review of the value of aggregators in electricity systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.014>
22. Kulyk, V. V., Zatkhei, M. V. (2024). Improving the Accuracy of the Forecast of Electricity Production by Photovoltaic Power Station Based on the Random Forest Method. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 177 (6), 52–61. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-52-61>

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.363631**  
**DEVELOPMENT OF ENTROPY TECHNOLOGIES**  
**FOR ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ENERGY**  
**EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS (p. 28–37)**

**Sergii Samiilenko**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2374-4294>

**Roman Hryshchenko**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5150-0107>

**Maksym Kryvosheiev**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-1021-1051>

The object of the study is the energy efficiency of technological systems and complexes of enterprises. The study solved the problem of scientifically based technologies for system analysis and optimization of energy efficiency of multi-purpose systems. It is proved that the traditional definition of energy efficiency fails to identify the fundamental causes of inefficiency and assess the energy efficiency potential of the system. The use of exergy technologies is effective for optimizing heat engines, but for heat technology systems it gives rise to methodological contradictions.

The presented entropic technologies for analyzing and optimizing energy efficiency do not have the indicated disadvantages. By combining entropic characteristics with energy characteristics, the "principle of energy compensation of irreversibility" was formulated, which is the basis of the analysis methodology.

The results of the applied analysis of sugar production, which has an energy generation system and an energy technological complex of complicated configuration, showed the effectiveness of this technology. It was determined that compensation only for the internal irreversibility of the processes of the energy generating system consumes about 55% of the primary energy resource, which can change the classical concept of energy efficiency measures.

The results obtained were made possible by establishing the dependence between the irreversibility of processes, entropy and compensatory energy costs. This allowed to approach the idea of energy efficiency in a new way, prioritizing the qualitative characteristics of processes and focusing on the thermodynamic perfection of systems.

The proposed entropic technologies can be the basis for the formation of a comprehensive energy optimization strategy that has both economic and environmental effects, contributing to compliance with international standards of sustainable development.

**Keywords:** energy efficiency, thermodynamic analysis, entropy, entropic analysis technologies, sustainability.

## References

1. Jan, B., Asif, M., Qannan, M. (2026). Energy efficiency and energy conservation: An analysis of global research trends, disparities, and future directions. *Energy Nexus*, 22, 100693. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2026.100693>
2. Nimesh, A. K., Srinivas, T. (2026). Energy Analysis of Organic Rankine Ejector Cooling Cogeneration Systems. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s41660-026-00749-2>
3. Elhelw, M., Al Dahma, K. S., Attia, A. e. H. (2019). Utilizing exergy analysis in studying the performance of steam power plant at two different operation mode. *Applied Thermal Engineering*, 150, 285–293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.003>
4. Zhang, Q., Yi, H., Yu, Z., Gao, J., Wang, X., Lin, H., Shen, B. (2018). Energy-exergy analysis and energy efficiency improvement of coal-fired industrial boilers based on thermal test data. *Applied Thermal Engineering*, 144, 614–627. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.069>
5. Menberg, K., Heo, Y., Choi, W., Ooka, R., Choudhary, R., Shukuya, M. (2017). Exergy analysis of a hybrid ground-source heat pump system. *Applied Energy*, 204, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.076>
6. Karellas, S., Braimakis, K. (2016). Energy–exergy analysis and economic investigation of a cogeneration and trigeneration ORC–VCC hybrid system utilizing biomass fuel and solar power. *Energy Conversion and Management*, 107, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.080>
7. Wu, J., Wang, J., Wu, J., Ma, C. (2019). Exergy and Exergoeconomic Analysis of a Combined Cooling, Heating, and Power System Based on Solar Thermal Biomass Gasification. *Energies*, 12 (12), 2418. <https://doi.org/10.3390/en12122418>
8. Ahmadi, G., Toghraie, D., Akbari, O. (2019). Energy, exergy and environmental (3E) analysis of the existing CHP system in a petrochemical plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.009>
9. Vazini Modabber, H., Khoshgoftar Manesh, M. H. (2021). Optimal exergetic, exergoeconomic and exergoenvironmental design of poly-generation system based on gas Turbine-Absorption Chiller-Solar parabolic trough collector units integrated with multi-effect desalination-thermal vapor compressor- reverse osmosis desalination systems. *Renewable Energy*, 165, 533–552. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.001>
10. Zhao, B. (2024). Entropy transfer efficiency-effectiveness method for heat exchangers, part 1: Local entropy generation number and operation performance limits. *Energy*, 304, 132133. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132133>
11. Ghazi, H., Emami, M. R. S., Seif, M., Pirzaman, A. K. (2025). Thermodynamic analysis of entropy generation in thermosyphon heat pipes using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid and distilled water. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 150 (19), 15805–15816. <https://doi.org/10.1007/s10973-025-14846-w>
12. Shende, A., Mishra, S. K., Tripure, A., Ghritlahre, H. K. (2025). Heat Transfer and Entropy Generation Analysis of an Artificially Roughened Solar Air Heater With a Rib-Fin Profile Absorber. *Journal of Solar Energy Engineering*, 147 (6). <https://doi.org/10.1115/1.4069862>
13. Vasilenko, S., Samiilenko, S., Bondar, Volodymyr, Bilyk, O. (2020). Complex thermodynamic analysis of the heat-technological complex of sugar production: analysis method. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (52)), 4–11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.202026>
14. Vasilenko, S., Samiilenko, S., Bondar, Volodymyr, Bilyk, O., Mokretskyy, V., Przybylski, W. (2020). Thermodynamic analysis of the thermal-technological complex of sugar production: the energy and entropy characteristics of an enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (105)), 24–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205148>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.364241

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПАРАЛЕЛЬНО ВВІМКНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ РІЗНОЇ ПОТУЖНОСТІ (с. 6–14)**

А. М. Панченко, І. Ю. Боклаг, Ю. Д. Мусаїрова, В. О. Гончаров, Н. М. Куравська

Об'єктом дослідження являються перехідні процеси та розподіл струму паралельно ввімкнутих трансформаторів на спільне навантаження. Проблема в тому, що математичний опис процесів виконується в миттєвих значеннях струму, де застосовуються параметри з одного боку і широко відомі, а з іншого рідко задіяні на практиці. Такий підхід дозволяє єдиною системою диференціальних рівнянь описати більшість режимів роботи трансформаторів, та переходи між ними, в єдиному часі. А це, в свою чергу, дає можливість отримати роздільні миттєві значення струмів по кожному трансформатору та урівноважувальний струм між ними. Тобто контролювати розподіл навантаження між трансформаторами, втрати енергії, як в усталених так і в перехідних режимах. Отримати такі дані контрольно-вимірювальними засобами майже не можливо.

В роботі доводиться, що слід враховувати і співвідношення активних і реактивних складових обмоток. Напруги короткого замикання можуть бути однаковими, а співвідношення між активними і реактивними опорами обмоток різними. А це і впливає на перехідні процеси і на урівноважувальний струм. Такі результати вдалося досягти склавши диференціальні рівняння паралельно ввімкнутих трансформаторів і навантаження. Встановлено, що загальна тривалість перехідних процесів зменшується при паралельному з'єднанні трансформаторів. В той же час, тривалість перехідних процесів урівноважувального струму взагалі не залежить від навантаження, а лише від параметрів трансформатора та від моменту комутації. Дослідження проводилися на трансформаторах ТМ-180/10 і ТМ-530/10, було підтверджено, що урівноважувальні струми мають малі значення, в порівнянні з струмами навантаження, але вони є величинами одного порядку з струмами намагнічування і можуть спотворювати криву намагнічування, що провокує вищі гармоніки. Для вказаних трансформаторів тривалість перехідних процесів по урівноважувальних струмах, при певних умовах, становила більше 1 сек., а при виникненні короткого замикання на спільних шинах більше 2 сек. Проведені дослідження показали, що з'являється можливість більшість параметрів, для вказаної системи рівнянь, виміряти на реальному трансформаторі. Також стає можливим розрахувати їх по паспортним даним і порівняти роботи моделей, в різних режимах. Це дозволить більш об'єктивно, оцінити технічний стан трансформатора.

**Ключеві слова:** індуктивність трансформатора, перехідні процеси, розподіл струмів, урівноважувальний струм, режими роботи.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.365476

**УДОСКОНАЛЕННЯ СТРАТЕГІЇ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ (с. 15–27)**

В. В. Кулик, М. В. Затхей, В. В. Тептя, Ю. В. Грицюк, С. Я. Вишневський, І. В. Грицюк

Об'єктом дослідження є процес функціонування акумуляторних установок зберігання енергії (УЗЕ) у комплексі з фотоелектричними станціями (ФЕС) в умовах конкурентного ринку електричної енергії. У роботі вирішується проблема підвищення ефективності функціонування електроенергетичних систем з глибоким проникненням ФЕС. Дослідження присвячене аналізу сценаріїв та оптимізації стратегії використання УЗЕ для підвищення економічної ефективності ФЕС, що працюють у комплексі. За результатами досліджень виявлено фактори, що впливають на техніко-економічні показники використання УЗЕ та запропоновано комбіновану стратегію керування ними.

Досліджено практичні сценарії керування УЗЕ з різними механізмами формування економічного ефекту, зокрема сценарій арбітражу ринку на добу наперед (РДН) та сценарій балансування ФЕС. Останній, крім мінімізації витрат на врегулювання небалансів, передбачає продаж надлишків збереженої енергії в години максимальної ціни.

Використання ансамблю методів машинного навчання (RandomForest + XGBoost + LightGBM), дало змогу досягти високої точності прогнозу генерування ФЕС. Для кожного сценарію керування УЗЕ на основі методів MILP та MPC було оптимізовано енергетичні показники та оцінено фінансові результати. Це дало змогу кількісно порівняти ефективність арбітражної та балансувальної стратегій та обґрунтувати вибір режиму роботи УЗЕ залежно від волатильності цін РДН, рівня прогнозованої невизначеності генерування та чинних правил врегулювання небалансів на ринку електроенергії.

Результати дослідження перевірялися на прикладі реальної ФЕС 9.5 МВт, що доповнена УЗЕ з енергоемністю 2 МВт · год, що дало змогу врахувати фінансову відповідальність виробника за небаланси та вплив цінової асиметрії на кінцевий результат.

**Ключові слова:** фотоелектрична станція, установка зберігання електроенергії, ринок електричної енергії, оптимізація функціонування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.363631

**РОЗРОБКА ЕНТРОПІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ (с. 28–37)**

С. М. Самійленко, Р. В. Гриценко, М. О. Кривошеєв

Об'єктом дослідження є енергетична ефективність технологічних систем та комплексів підприємств. У дослідженні вирішувалася проблема науково обґрунтованих технологій системного аналізу та оптимізації енергетичної ефективності різноцільових систем. Доведено, що традиційне визначення енергоефективності не дозволяє встановити фундаментальні причини неефективності та оцінити

енергоефективний потенціал системи. Застосування ексергетичних технологій ефективно для оптимізації теплових машин, проте для теплотехнологічних систем породжує методологічні суперечності.

Представлені ентропійні технології аналізу та оптимізації енергоефективності не мають зазначених недоліків. Поєднавши ентропійні характеристик з енергетичними, сформульовано «принцип енергетичної компенсації необоротності», який закладено в основу методології аналізу.

Результати прикладного аналізу цукрового виробництва, яке володіє системою генерації енергії та енерготехнологічним комплексом складної конфігурації, показали ефективність цієї технології. Визначено, що компенсація лише внутрішньої необоротності процесів енергогенеруючої системи споживає близько 55% первинного енергоресурсу, що може змінити класичну концепцію енергоефективних заходів.

Отримані результати стали можливими завдяки встановленню взаємозв'язків між необоротністю процесів, ентропією і компенсаційними енергетичними затратами. Це дозволило по-новому підійти до ідеї енергоефективності, висуваючи на передній план якісні характеристики процесів та акцентуючи увагу на термодинамічній досконалості систем.

Запропоновані ентропійні технології можуть бути основою для формування комплексної стратегії енергетичної оптимізації, що має як економічний, так і екологічний ефект, сприяючи відповідності міжнародним стандартам сталого розвитку.

**Ключові слова:** енергетична ефективність, термодинамічний аналіз, ентропія, ентропійні технології аналізу, сталий розвиток.