

ABSTRACT AND REFERENCES

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.336113

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SECONDARY LOAD FREQUENCY CONTROL IN A POWER SYSTEM CONSIDERING INTERNAL TIE-LINE POWER EXCHANGES (p. 6–15)**Oleksandr Yandulskiy**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0362-7947>**Volodymyr Hulyi**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2145-4082>**Artem Nesterko**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7488-4214>**Mykhailo Kovalenko**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>**Oleksandr Tymokhin**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9862-1766>

This study's object is the processes of frequency and power adjustment in the power system of Ukraine, which is connected to parallel operation with a neighboring power system.

The current issues related to increasing the efficiency of secondary frequency and power adjustment in the unified power system of Ukraine, which operates in parallel with the European power system (ENTSO-E), have been considered. The factors associated with the introduction of renewable energy sources, the growing role of decentralized generation, and the need to take into account the limitations of internal tie-lines in the power system when distributing the load have been analyzed.

An analysis of approaches to automatic frequency and power adjustment was conducted; the shortcomings of existing solutions were identified, including simplification of the network topology, failure to take into account the technical limitations of power units and reserves, as well as limitations in internal controlled tie-lines.

An improved approach to secondary adjustment based on the method of predictive models has been proposed, which makes it possible to take into account these limitations and improve the efficiency of secondary frequency and power adjustment in the power system. The study of the processes was performed on a dynamic model of the power system with real parameters; the effectiveness of the proposed approach was confirmed by comparison with the conventional proportional-integral control law of the automatic frequency and power control system.

It has been shown that the implementation of the devised approach provides a reduction in frequency recovery time by 8% and prevents overloading of controlled sections, increasing the stability and reliability of the power system under the conditions of modern challenges. The has proposed approach made it possible to

increase the efficiency of secondary frequency and power control in the power system.

Keywords: frequency control, power flow limitation, model predictive control, power system stability.

References

1. Liu, Y., Qu, Z., Xin, H., Gan, D. (2017). Distributed Real-Time Optimal Power Flow Control in Smart Grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32 (5), 3403–3414. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2016.2635683>
2. Ohanu, C. P., Rufai, S. A., Oluchi, U. C. (2024). A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*, 10 (3), e25705. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705>
3. Fan, W., Hu, Z., Veerasamy, V. (2022). PSO-Based Model Predictive Control for Load Frequency Regulation with Wind Turbines. *Energies*, 15 (21), 8219. <https://doi.org/10.3390/en15218219>
4. Qi, X., Zheng, J., Mei, F. (2022). Model Predictive Control-Based Load-Frequency Regulation of Grid-Forming Inverter-Based Power Systems. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.932788>
5. Zhao, D., Sun, S., Mohammadzadeh, A., Mosavi, A. (2022). Adaptive Intelligent Model Predictive Control for Microgrid Load Frequency. *Sustainability*, 14 (18), 11772. <https://doi.org/10.3390/su141811772>
6. Ersdal, A. M., Imsland, L., Uhlen, K. (2016). Model Predictive Load-Frequency Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31 (1), 777–785. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2015.2412614>
7. Dangeti, L. satya nagasri, R., M. (2025). Distributed model predictive control strategy for microgrid frequency regulation. *Energy Reports*, 13, 1158–1170. <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.12.071>
8. Zheng, Y., Zhou, J., Xu, Y., Zhang, Y., Qian, Z. (2017). A distributed model predictive control based load frequency control scheme for multi-area interconnected power system using discrete-time Laguerre functions. *ISA Transactions*, 68, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2017.03.009>
9. Yang, J., Sun, X., Liao, K., He, Z., Cai, L. (2019). Model predictive control-based load frequency control for power systems with wind-turbine generators. *IET Renewable Power Generation*, 13 (15), 2871–2879. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.6179>
10. Yandulskiy, O., Marchenko, A., Hulyi, V. (2018). Analysis of Efficiency Of Primary Load-Frequency Control of Integrated Power System of Ukraine. 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 244–247. <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559567>
11. Yandulskiy, O. S., Nesterko, A. B. (2015). Power system model identification using synchronized measurements of transient modes. *Tekhnichna elektrodynamika*, 5, 59–62. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2015_5_12
12. Kunya, A. B., Argin, M., Jibril, Y., Shaaban, Y. A. (2020). Improved model predictive load frequency control of interconnected power system with synchronized automatic generation control loops. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 9 (1). <https://doi.org/10.1186/s43088-020-00072-w>
13. Stanojev, O., Markovic, U., Aristidou, P., Hug, G., Callaway, D., Vrettos, E. (2022). MPC-Based Fast Frequency Control of Voltage Source Converters in Low-Inertia Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 37 (4), 3209–3220. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2999652>

14. Liu, J., Yao, Q., Hu, Y. (2019). Model predictive control for load frequency of hybrid power system with wind power and thermal power. *Energy*, 172, 555–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.071>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337918

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF ENERGY CHARACTERISTICS OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR USING FREQUENCY CONVERSION WITH PULSE-WIDTH MODULATION (p. 16–25)

Makpal Zharkymbekova

Non-Profit Joint Stock Company

“Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev”,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Marat Mustafin

Non-Profit Joint Stock Company

“Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev”,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7559-9285>

Nurgul Almuratova

Non-Profit Joint Stock Company

“Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev”,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-9822>

Katipa Chezhibayeva

Non-Profit Joint Stock Company

“Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev”,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1661-2226>

Markhabat Sakitzhano

Non-Profit Joint Stock Company

“Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev”,
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

Yerzhan Domalatov

Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University,

Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9955-9282>

The object of the study is a three-phase frequency converter (FC) with an uncontrolled rectifier and pulse-width modulation (PWM) of the output voltage, used for frequency regulation of asynchronous motors (AM). The problem to be solved is the improve the energy efficiency of the electric drive and the accuracy of speed control while reducing harmonic distortions of voltage and current, which is especially important for industrial installations operating in continuous or alternating mode. In the work in the Mathcad environment, a mathematical model of the FC was developed, including a power circuit, an algorithm for generating PWM and dependencies for calculating the power factor, efficiency and total harmonic distortion (THD). The model allows performing parametric studies of the effect of frequency and amplitude of the output voltage on the energy indicators of the drive with a high degree of detail. The simulation results showed that the optimized sinusoidal PWM algorithm with ordered switching distribution reduces THD by 18–22% and increases the power factor to

0.94–0.96 due to a more uniform harmonic spectrum distribution and reduced reactive losses. The advantage of the proposed model is the ability to adapt to various AM operating modes and load conditions without changing the structure of the power section, which expands its practical application. The obtained results can be used in the design and modernization of industrial electric drive systems, pump and fan units, as well as in automated complexes where economical, reliable and high-precision speed control is required. It further enables sensitivity checks and controller tuning to evaluate PWM strategies under realistic limit.

Keywords: frequency converter, pulse-width modulation, asynchronous motor, power factor, harmonic distortion.

References

1. Darimbaeva, N., Mustafin, M., Almuratova, N., Zhauyt, A. (2021). Development of a mathematical model of frequency controlled induction electric drive. *Journal of Vibroengineering*, 23 (8), 1833–1844. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.22051>
2. Mustafin, M., Almuratova, N. (2019). “Mathcad” for electric power students. Almaty: AUPET, 78.
3. Postnikov, I. M. (1962). Designing of electrical machines. Kyiv, 736.
4. Sieklucki, G., Sobieraj, S., Gromba, J., Necula, R.-E. (2023). Analysis and Approximation of THD and Torque Ripple of Induction Motor for SVPWM Control of VSI. *Energies*, 16 (12), 4628. <https://doi.org/10.3390/en16124628>
5. Dems, M., Komeza, K., Majer, K. (2021). Core losses of the induction motor operating in a wide frequency range supplied from the inverter. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 64, S65–S82. <https://doi.org/10.3233/jae-209506>
6. Novokshenov, V. S., Sembin, D. Ye. (2000). Energoberegayushchiy asinkhronniy dvigatel’ provoda nasosa [Energy-saving asynchronous motor pump wire]. *Sat. «Energy and Fuel Resources of Kazakhstan»*, 2.
7. Sembin, D. Ye. (2000). Optimizatsiya geometrii statora energoberegayushchego asinkhronnogo dvigatelya chastotno-reguliruyemogo privoda nasosa nefteperkachivayushchey stantsii [Optimization of the geometry of the stator of an energy-saving asynchronous motor of a variable frequency drive of a pump of an oil pumping station]. *Sat. scientific papers based on the materials of the second international scientific and technical conference AIPET*.
8. Petrushyn, V., Horoshko, V., Plotkin, J., Almuratova, N., Toigozhinova, Z. (2021). Power Balance and Power Factors of Distorted Electrical Systems and Variable Speed Asynchronous Electric Drives. *Electronics*, 10 (14), 1676. <https://doi.org/10.3390/electronics10141676>
9. Yamazaki, K., Kuramochi, S. (2012). Additional harmonic losses of induction motors by PWM inverters: Comparison between result of finite element method and IEC/TS 60034. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 1552–1558. <https://doi.org/10.1109/icelmach.2012.6350085>
10. Petrushin, V., Plotkin, J., Almuratova, N., Mustafin, M., Zharkymbekova, M. (2023). Discounted Costs Range Criterion Modification for Controlled Asynchronous Electric Drives. *Energies*, 16 (15), 5704. <https://doi.org/10.3390/en16155704>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337285

DEVISING A METHOD FOR DESIGNING MULTICOMPONENT DIFFUSERS OF COMPRESSORS IN TURBOGENERATORS WITH HYDROGEN COOLING (p. 26–38)

Oleksii Tretiak

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-5784>

Stanislav Kravchenko

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6409-4767>

Bogdan Shestak

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0659-5394>

Denys Shpitalnyi

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4255-7935>

Mariia Arefieva

ITSTEP SCHOOL, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2569-0194>

Iryna Tretiak

Limited Liability Company

«Kharkov Electric Machine-Building Plant»,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4414-1333>

Serhii Serhiienko

Limited Liability Company

«Kharkov Electric Machine-Building Plant»,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6377-209X>

Anton Kovryga

JSC “Ukrainian Energy Machines”, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5843-8349>

This study's object is the aerodynamic characteristics of the compressor diffusers in hydrogen-cooled turbogenerators.

This paper reports a solution to the task of improving the efficiency of a cooling system discharge unit. This issue relates to enabling the necessary gas consumption while reducing the number of diffuser blades. The problem was solved by introducing a seal with improved technological control capabilities and step-by-step optimization of the diffuser flow part.

Another issue is the thermal loads on the power components of the diffuser unit due to the action of circulating currents and temperature gradients. The problem was solved by introducing dielectric and non-magnetic elements into the structure, by additional finning and multi-component design for the diffuser strength circuits.

The main result is the designed multi-component diffuser structure with a number of blades of 20 while enabling a head of $H_{st} = 978 \text{ mm H}_2\text{O}$. The adopted duct opening angle was 20° . Other necessary geometric parameters were determined. The introduction of a multilayer seal made it possible to reduce the gap between the impeller and the diffuser to 0.9 mm. The proposed design was tested on the bench at a manufacturing enterprise.

The results of the study are attributed to the use of non-magnetic and dielectric materials (AISI 321 steel and fiberglass), as well as the introduction of additional strength decoupling elements.

A special feature of the proposed method is the application of mathematical models based on the basic equations of gas dynamics, taking into account the composition principles of engineering alloys and synthetic materials. This could be achieved via a step-by-step optimization of the design.

The proposed structure could be implemented when designing and modernizing hydrogen-cooled turbogenerators.

Keywords: turbogenerator, compressor diffuser, multilayer seal, gas-dynamic calculations, circulating currents.

References

1. Biswal, G. R., Dewal, M. L., Maheshwari, R. P. (2012). A comprehensive scheme for cooling of large generators using hydrogen cooling systems. 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, 105–109. <https://doi.org/10.1109/cspa.2012.6194700>
2. Pulagam, M. K. R., Rout, S. K., Muduli, K. K., Syed, S. A., Barik, D., Hussein, A. K. (2024). Internal Finned Heat Exchangers: Thermal and Hydraulic Performance Review. International Journal of Heat and Technology, 42 (2), 583–592. <https://doi.org/10.18280/ijht.420225>
3. Venkatesh, B., Kiran, A., Khan, M., Rahmani, M. K. I., Upadhyay, L., Babu, J. C., Narayana, T. L. (2024). Performance optimization for an optimal operating condition for a shell and heat exchanger using a multi-objective genetic algorithm approach. PLOS ONE, 19 (6), e0304097. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304097>
4. Balitskii, A. I., Syrotyuk, A. M., Havrilyuk, M. R., Balitska, V. O., Kolesnikov, V. O., Ivaskevych, L. M. (2023). Hydrogen Cooling of Turbo Aggregates and the Problem of Rotor Shafts Materials Degradation Evaluation. Energies, 16 (23), 7851. <https://doi.org/10.3390/en16237851>
5. Balitskii, A. I., Kvasnytska, Y. H., Ivaskevych, L. M., Kvasnytska, K. H., Balitskii, O. A., Shalevska, I. A. et al. (2023). Hydrogen and Corrosion Resistance of Nickel Superalloys for Gas Turbines, Engines Cooled Blades. Energies, 16 (3), 1154. <https://doi.org/10.3390/en16031154>
6. Dong, J., Song, B., Yuan, X., Jin, W., Wang, J. (2024). Research on aerodynamic performance of centrifugal compressors for hydrogen-mixed natural gas. PLOS ONE, 19 (10), e0312829. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312829>
7. Zhang, Y., Xu, S., Wan, Y. (2020). Performance improvement of centrifugal compressors for fuel cell vehicles using the aerodynamic optimization and data mining methods. International Journal of Hydrogen Energy, 45 (19), 11276–11286. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.026>
8. SanAndres, U., Almandoz, G., Poza, J., Ugalde, G. (2014). Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (8), 4383–4391. <https://doi.org/10.1109/tie.2013.2286081>
9. Dang, D.-D., Pham, X.-T., Labbe, P., Torriano, F., Morissette, J.-F., Hudon, C. (2018). CFD analysis of turbulent convective heat transfer in a hydro-generator rotor-stator system. Applied Thermal Engineering, 130, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.034>
10. Korovkin, N. V., Verkhovtsev, D., Gulay, S. (2021). Rotor Air-Cooling Efficiency of Powerful Turbogenerator. IEEE Transactions on Energy Conversion, 36 (3), 1983–1990. <https://doi.org/10.1109/tec.2020.3045063>
11. Peng, Q., Bao, R., Li, J., Ren, J., Tang, J., Li, J. et al. (2024). Centrifugal compressor performance prediction and dynamic simulation of natural gas hydrogen blended. International Journal of Hydrogen Energy, 52, 872–893. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.023>
12. Taher, M., Evans, F. (2021). Centrifugal Compressor Polytropic Performance – Improved Rapid Calculation Results – Cubic Polynomial Methods. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power, 6 (2), 15. <https://doi.org/10.3390/ijtp6020015>
13. Taher, M., Evans, B. (2020). Using a Cubic Polynomial Temperature-Entropy Constant Efficiency Path for Centrifugal Compressor Polytropic Performance Evaluation. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.23470.54083/1>
14. Evans, B. F., Huble, S. (2017). Centrifugal Compressor Performance: Making Enlightened Analysis Decisions. In Proceedings of the 46th Turbomachinery Symposium. Available at: <https://oaktrust.li->

brary.tamu.edu/server/api/core/bitstreams/24440913-33e7-4938-9fcf-c6aa37860751/content

15. Zhou, G.-H., Han, L., Fan, Z.-N., Zhang, H.-B., Dong, X.-C., Wang, J. et al. (2018). Ventilation Cooling Design for a Novel 350-MW Air-Cooled Turbo Generator. *IEEE Access*, 6, 62184–62192. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2875757>
16. Tang, Q., Wu, H., Li, J., Lou, H., Yang, C. (2022). Performance Optimization of Centrifugal Compressors Based on Throughflow Model. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47 (12), 16439–16450. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06736-2>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.335712

CONSTRUCTION OF AN INFORMATION MODEL OF THE DIGITAL TWIN OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS IN A POWER UNIT AT A NUCLEAR POWER PLANT (p. 39–49)

Pavlo Budanov

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1542-9390>

Kostiantyn Brovko

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9669-9316>

Vyacheslav Melnikov

LLC Equator Sun Energy,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-6805>

Mykola Yakymchuk

National University of Food Technologies,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1905-3546>

Volodymyr Kononov

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-0819-4668>

Ihor Kyrsov

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-9936>

Andrii Nosyk

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4171-1875>

Oleh Karpenko

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4009-1990>

Sergiy Kalnoy

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7207-4282>

Eduard Khomiak

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2579-2986>

This study’s object is the technological process that occurs at the power unit of a nuclear power plant, which is considered as a complex technical system with a multi-level hierarchical structure of

functional subsystems. This paper addresses the task to improve the efficiency of modeling, monitoring, and controlling the technological process at a nuclear power plant as a complex technical system with a multi-level hierarchical structure.

A new approach to modeling the modes of a nuclear power plant based on system-cluster theory has been proposed. A cluster structure with key subclusters has been built: power control, protection, heat carrier adjustment, and emergency shutdown. Mathematical models have been constructed that take into account physical processes and logical-dynamic behavior of the monitoring and control system.

A feature of the devised approach is the use of the value of fractal dimensionality as a quantitative indicator of the self-similar scaled structure of functional subclusters. An algorithm for calculating fractal dimensionality has been proposed, which allows for real-time analysis of dynamic changes in the external and internal structure of the power unit process control.

Threshold values of the fractal dimensionality of subclusters have been determined for comparison with current parameters under normal and emergency modes.

It was established that the loss of one control level in a sub-cluster leads to a decrease in fractal dimensionality from 1.83 to 1.60, signaling a possible degradation of the SCADA level.

A model of a digital twin of the power unit process has been built based on a system-cluster approach, which allows for the implementation of visualization, simulation, monitoring, and diagnostics functions.

Keywords: power plant, fractal dimensionality, cluster modeling, digital twin, technological parameters, emergency.

References

1. Foshch, T., Portela, F., Machado, J., Maksimov, M. (2016). Regression Models of the Nuclear Power Unit VVER-1000 Using Data Mining Techniques. *Procedia Computer Science*, 100, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.151>
2. Puviani, P. C., Del Moro, T., Gonfioiti, B., Martelli, D., Giannetti, F., Zanino, R. et al. (2025). A novel Ansys CFX – RELAP5 coupling tool for the transient thermal-hydraulic analysis of liquid metal systems. *Progress in Nuclear Energy*, 180, 105590. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105590>
3. Li, J., Wang, M., Fang, D., Wang, J., Liu, D., Tian, W. et al. (2021). CFD simulation on the transient process of coolant mixing phenomenon in reactor pressure vessel. *Annals of Nuclear Energy*, 153, 108045. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108045>
4. Zhang, K., Pianos, A., Raimondi, L., Abe, F., Sugawara, Y., Caliskanelli, I. et al. (2024). Towards safe, efficient long-reach manipulation in nuclear decommissioning: A case study on fuel debris retrieval at Fukushima Daiichi. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 62 (1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/00223131.2024.2386478>
5. Betzler, B. R., Powers, J. J., Worrall, A. (2017). Molten salt reactor neutronics and fuel cycle modeling and simulation with SCALE. *Annals of Nuclear Energy*, 101, 489–503. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.11.040>
6. Dechenaux, B., Delcambre, T., Dumonteil, E. (2022). Percolation properties of the neutron population in nuclear reactors. *Physical Review E*, 106 (6). <https://doi.org/10.1103/physreve.106.064126>
7. Budanov, P., Kyrsov, I., Oliinyk, Y., Brovko, K., Zhukov, S. (2025). Fractal Approach for Researching Information Emergency Features of Technological Parameters. *International Journal of Computing*, 24 (1), 171–177. <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3889>
8. Budanov, P., Oliinyk, Y., Cherniuk, A., Brovko, K. (2024). Dynamic Fractal Cluster Model of Informational Space Technological Process of Power Station. *Information Technology for Education*,

- Science, and Technics. Cham: Springer, 141–155. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11
9. Bugrii, N. A., Bykovskii, P. N., Vasil'ev, S. V., Epifanov, S. V., Koli-bas, G. V., Korablev, K. V. et al. (2021). Integrated Modernization of Safety Control Systems and Normal Operation Systems of Unit 3 of Smolensk NPP. *Atomic Energy*, 129 (4), 222–226. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00737-4>
 10. Ramezani, A., Nazari, T., Noori-Kalkhoran, O. (2021). A proposed improvement for the design of safety injection system in VVER-1000/V446 reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 137, 103767. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103767>
 11. Budanov, P., Khomiak, E., Kyrysov, I., Brovko, K., Kalnoy, S., Karpenko, O. (2022). Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (118)), 60–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>
 12. Budanov, P., Kyrysov, I., Brovko, K., Rudenko, D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. (2021). Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (111)), 75–89. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>
 13. Espinosa-Paredes, G., Cruz-López, C.-A. (2024). A new compartmental fractional neutron point kinetic equations with different fractional orders. *Nuclear Engineering and Design*, 423, 113184. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113184>
 14. Budanov, P., Oliynyk, Y., Cherniuk, A., Brovko, K. (2024). Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters. *AIP Conference Proceedings*. Al-Samawa, 3051 (1). <https://doi.org/10.1063/5.0191648>
 15. Louis, H. K. (2021). Assessment of neutronic safety parameters of VVER-1000 core under accident conditions. *Progress in Nuclear Energy*, 132, 103609. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103609>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.336113

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВТОРИННОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ З ВРАХУВАННЯМ ПЕРЕТОКІВ ПО ВНУТРІШНІХ ПЕРЕТИНАХ (с. 6–15)

О. С. Яндульський, В. С. Гулий, А. Б. Нестерко, М. А. Коваленко, О. В. Тимохін

Об'єктом дослідження є процеси регулювання частоти та потужності в енергосистемі України, яка підключена на паралельну роботу з сусідньою енергосистемою. Розглянуто актуальні питання підвищення ефективності вторинного регулювання частоти та потужності в об'єднаній енергосистемі України, що працює паралельно з європейською енергосистемою (ENTSO-E). Проаналізовано фактори, які пов'язані з впровадженням відновлюваних джерел енергії, зростанням ролі децентралізованої генерації та необхідністю врахування обмежень внутрішніх перетинів в енергосистемі при розподілі навантаження. Проведено аналіз підходів до автоматичного регулювання частоти та потужності, виявлено недоліки існуючих рішень, серед яких спрощення топології мережі, неврахування технічних обмежень енергоблоків і резервів, обмежень у внутрішніх контрольованих перетинах. Запропоновано вдосконалений підхід до вторинного регулювання на основі методу прогнозуючих моделей, що дозволяє враховувати ці обмеження та підвищити ефективність вторинного регулювання частоти та потужності в енергосистемі. Дослідження процесів виконано на динамічній моделі енергосистеми з реальними параметрами, а ефективність запропонованого підходу підтверджено порівнянням із традиційним пропорційно-інтегральним законом регулювання системи автоматичного регулювання частоти та потужності. Показано, що впровадження розробленого підходу забезпечує зменшення часу відновлення частоти на 8% та запобігає перевантаженню контрольованих перетинів, підвищуючи стійкість і надійність роботи енергосистеми в умовах сучасних викликів. Запропонований підхід дозволив підвищити ефективність вторинного регулювання частоти та потужності в енергосистемі.

Ключові слова: регулювання частоти, обмеження перетоку потужності, метод прогнозуючих моделей, стійкість енергосистеми.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337918

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ З ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ (с. 16–25)

Makpal Zharkymbekova, Marat Mustafin, Nurgul Almuratova, Katipa Chezhimbayeva, Markhabat Sakitzhonov, Yerzhan Domalatov

Об'єктом дослідження є трифазний перетворювач частоти (ПЧ) з некерованим випрямлячем та широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) вихідної напруги, що використовується для частотного регулювання асинхронних двигунів (АД). Проблема, що потребує вирішення, полягає у підвищенні енергоефективності електроприводу та точності регулювання швидкості при одночасному зменшенні гармонійних спотворень напруги та струму, що особливо важливо для промислових установок, що працюють у безперервному або змінному режимі. У роботі в середовищі Mathcad розроблено математичну модель ПЧ, що включає силову схему, алгоритм генерації ШІМ та залежності для розрахунку коефіцієнта потужності, ККД та повного коефіцієнта гармонійних спотворень (КГС). Модель дозволяє виконувати параметричні дослідження впливу частоти та амплітуди вихідної напруги на енергетичні показники приводу з високим ступенем деталізації. Результати моделювання показали, що оптимізований синусоїдальний алгоритм ШІМ з упорядкованим розподілом комутацій зменшує КГС на 18–22% та збільшує коефіцієнт потужності до 0,94–0,96 завдяки більш рівномірному розподілу гармонік у спектрі та зменшенню реактивних втрат. Перевагою запропонованої моделі є здатність адаптуватися до різних режимів роботи АД та умов навантаження без зміни структури силових частини, що розширює її практичне застосування. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації промислових електроприводних систем, насосних та вентиляторних агрегатів, а також в автоматизованих комплексах, де потрібне економічне, надійне та високоточне керування швидкістю. Це також дозволяє проводити перевірку чутливості та налаштування контролера для оцінки стратегій ШІМ в реальних межах.

Ключові слова: перетворювач частоти, широтно-імпульсна модуляція, асинхронний двигун, коефіцієнт потужності, гармонійні спотворення.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.337285

СТВОРЕННЯ МЕТОДУ ПРОЄКТУВАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ДИФУЗОРІВ КОМПРЕСОРІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ З ВОДНЕВИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ (с. 26–38)

О. В. Третьак, С. С. Кравченко, Б. К. Шестак, Д. М. Шпітальний, М. А. Арефьева, І. І. Третьак, С. А. Сергієнко, А. Є. Коврига

Об'єктом дослідження є аеродинамічні характеристики дифузорів компресорів турбогенераторів з водневим охолодженням.

В дослідженні вирішувалась проблема підвищення ефективності нагнітального вузла системи охолодження, пов'язана з забезпеченням необхідних витрат газу при зменшенні кількості лопаток дифузора. Проблема вирішувалась введенням ущільнення з покращеною можливістю технологічного регулювання та покроковою оптимізацією проточної частини дифузора. Іншою проблемою є теплові навантаження на силові компоненти вузла дифузора внаслідок дії циркулюючих струмів та через температурні градієнти. Проблема вирішувалась впровадженням діелектричних і немагнітних елементів в конструкцію, додаткового оребрення та багатокомпонентності для силових контурів дифузора.

Основним результатом дослідження є створена конструкція багатокомпонентного дифузору з кількістю лопаток 20 при забезпеченні напору $H_{st} = 978$ мм в. ст. Прийнятий кут розкриття каналу становив 20° . Були визначені інші необхідні геометричні параметри. Впровадження багат шарового ущільнення дозволило зменшити проміжок між робочим колесом і дифузором до 0,9 мм. Запропонована конструкція пройшла випробування на стенді підприємства-виробника.

Результати пояснюються застосуванням немагнітних та діелектричних матеріалів (сталь AISI 321 та склотекстоліт), впровадження додаткових елементів силової розв'язки, покровою оптимізацією проточної частини.

Особливістю запропонованого методу є використання математичних моделей, заснованих на основних рівняннях газодинаміки, з урахуванням принципів композиції інженерних сплавів і синтетичних матеріалів та з покровою оптимізацією конструкції.

Запропонована конструкція може бути впроваджена при проектуванні та модернізації турбогенераторів з водневим охолодженням.

Ключові слова: турбогенератор, дифузор компресора, багат шарове ущільнення, газодинамічні розрахунки, циркулюючі струми.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.335712

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОБЛОКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ (с. 39–49)

П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, В. Є. Мельников, М. В. Якимчук, В. Б. Кононов, І. Г. Кирисов, А. М. Носик, О. В. Карпенко, С. Е. Кальний, Е. А. Хом'як

Об'єктом дослідження є технологічний процес, який відбувається на енергоблоці атомної електростанції, що розглядається як складна технічна система з багаторівневою ієрархічною структурою функціональних підсистем. В рамках дослідження вирішувалась проблема підвищення ефективності моделювання, моніторингу та управління технологічним процесом енергоблоку АЕС як складної технічної системи з багаторівневою ієрархічною структурою.

Запропоновано новий підхід до моделювання режимів енергоблоку АЕС на основі системно-кластерної теорії. Створено кластерну структуру з ключовими підкластерами: керування потужністю, захист, регулювання теплоносія та аварійна зупинка. Розроблено математичні моделі, що враховують фізичні процеси та логіко-динамічну поведінку системи моніторингу і контролю.

Особливістю розробленого підходу є використання величини фрактальної розмірності як кількісного показника самоподібної масштабованої структури функціональних підкластерів. Запропоновано алгоритм обчислення фрактальної розмірності, який дозволяє у режимі реального часу здійснювати аналіз динамічних змін у зовнішній та внутрішній структурі керування технологічним процесом енергоблоку.

Визначено порогові значення фрактальної розмірності підкластерів для порівняння з поточними параметрами в штатних і аварійних режимах.

Досліджено, що втрата одного рівня керування в підкластері призводить до зменшення фрактальної розмірності з 1,83 до 1,60, сигналізуючи про можливу деградацію SCADA-рівня.

Побудовано модель цифрового двійника технологічного процесу енергоблоку на основі системно-кластерного підходу, що дозволяє реалізувати функції візуалізації, симуляції, моніторингу та діагностики.

Ключові слова: електростанція, фрактальна розмірність, кластерне моделювання, цифровий двійник, технологічні параметри, аварійність.