

АНОТАЦІЯ

Зубак В. В. Моделі та методи автоматизованого управління балансом потужності та частоти електроенергетичної системи для підвищення її ефективності за умов дії проєктних та позапроєктних збурень. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, 2026.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності функціонування електроенергетичної системи за умов дії проєктних та позапроєктних збурень шляхом розроблення комплексної імітаційної та динамічної моделей, а також удосконалення методу автоматизованого структурно-параметричного управління балансом потужності та частоти. Для досягнення цієї мети в роботі розроблено комплексну імітаційну модель електроенергетичної системи, яка складається зі структурної, об'єктно-орієнтованої, математичної, стохастичної та табличної моделей для формалізації елементів системи, інформаційних та фізичних потоків, зміни параметрів та станів елементів в результаті дії проєктних та позапроєктних збурень. Удосконалено метод автоматизованого структурно-параметричного управління та розроблено динамічну модель управління балансом потужності і частоти в електроенергетичній системі в результаті дії проєктних та позапроєктних збурень. Запропоновано метод оцінки ефективності поставки електричної енергії за різних режимів роботи системи.

У першому розділі «Аналіз існуючих методів, моделей та стратегій керування балансом потужності та частоти в електроенергетичній системі за умов дії проєктних та позапроєктних збурень» було зроблено наступне.

– Визначено процес управління активною генеруючою потужністю як об'єкт управління для вирішення задач забезпечення балансу потужності та частоти, так як зміна активної потужності безпосередньо впливає на відхилення частоти та порушення нормального режиму роботи електроенергетичної системи.

– Розглянуто існуючі моделі та методи регулювання частоти та потужності, а саме: первинне регулювання частоти за миттєвим відхиленням та вторинне регулювання частоти за інтегральним відхиленням. Встановлено, що регулювання потужності та частоти за миттєвим відхиленням характеризується швидкою реакцією та спрямоване на утримання частоти, однак при цьому зберігається її усталене залишкове відхилення. Регулювання потужності та частоти за інтегральним відхиленням поєднує швидку реакцію регулювання за миттєвим відхиленням та формує додатковий керуючий вплив, пропорційний накопиченому в часі відхиленню частоти, що забезпечує усунення усталеного залишкового відхилення частоти.

– Встановлено, що управління топологією структури електроенергетичної системи виконується переважно оперативним персоналом відповідно до команд диспетчера, що свідчить про відсутність автоматизованого управління структурою системи та необхідність удосконалення існуючих методів параметричного управління. Автоматизована система керування балансом потужності та частоти повинна забезпечувати як параметричне регулювання, так і структурне управління топологією електроенергетичної системи в залежності від величини збурення. Це зумовлює необхідність формалізації вибору найкращої структури електроенергетичної системи на основі функціоналу критерію якості.

– Розглянуто існуючі види моделей для можливості дослідження роботи електроенергетичної системи. Встановлено необхідність розроблення комплексної імітаційної моделі електроенергетичної системи, яка поєднує об'єктно-орієнтовану, математичну, стохастичну, табличну та структурну модель для формалізації об'єктів системи, інформаційних та фізичних потоків між ними із застосуванням інформаційних технологій, оцінки стану елементів та визначення надійності енергетичного обладнання в умовах дії проєктних та позапроєктних збурень.

– Проаналізовано вплив проєктних та позапроєктних збурень та їх наслідків у світовій практиці.

У другому розділі «Комплексна імітаційна модель та моделювання електроенергетичної системи» отримано наступні результати.

– Розроблено комплексну імітаційну модель на основі п'яти видів моделей, а саме: структурної, об'єктно-орієнтованої, стохастичної, математичної та табличної моделей, що забезпечило можливість завдяки інформаційним технологіям формалізувати елементи системи, інформаційні та фізичні потоки, зміну параметрів і станів елементів, а також виконати імітаційне моделювання електроенергетичної системи в результаті дії проєктних та позапроєктних збурень. На основі об'єктно-орієнтованого аналізу було визначено основні об'єкти електроенергетичної системи, як абстракції предметів реального світу, їхні атрибути та зв'язки. За допомогою математичного моделювання виконано опис об'єктів, що характеризують режим роботи системи на основі фізичних величин активної та реактивної потужностей, напруги, втрат активної потужності та втрат напруги. Фізико-математична модель забезпечила поєднання параметрів елементів та процесів зміни активної потужності, частоти та напруги. Стохастична модель забезпечила врахування ймовірнісного характеру відмов елементів, що надало можливість оцінити надійність енергетичного обладнання та електроенергетичної системи в умовах дії проєктних та позапроєктних збурень. За допомогою табличної моделі зафіксовано параметри, розрахункові показники та стани елементів для подальшого розрахунку режиму роботи електроенергетичної системи. Структурна модель забезпечила синтез системи комплексного опису енергосистеми шляхом інтеграції об'єктно-орієнтованої, стохастичної, математичної та табличної моделей в єдину комплексну імітаційну модель, що дало можливість виконати імітаційне моделювання, формалізувати елементи системи, інформаційні та фізичні потоки, зміну їх параметрів і станів, для подальшого аналізу режиму роботи електроенергетичної системи та управління балансом потужності та частоти.

У третьому розділі «Модель та метод автоматизованого управління балансом потужності та частоти електроенергетичної системи за умов дії проєктних та позапроєктних збурень» виконано наступне.

– Удосконалено метод автоматизованого структурно-параметричного управління балансом потужності та частоти в результаті дії проєктних та позапроєктних збурень. Удосконалення методу виконано шляхом синтезу системи,

що поєднує параметричне управління балансом потужності та частоти зі структурним управлінням топологією електроенергетичної системи, що забезпечило формування єдиного методу автоматизованого структурно-параметричного управління. Запропонована система керування забезпечує аналіз відхилення частоти від номінального значення та перевірку балансу активної потужності в електроенергетичній системі. У разі профіциту активної потужності формується керуючий вплив на зменшення генерації електричної енергії. У протилежному випадку автоматизована система керування виконує перевірку наявного резерву активної потужності, і за умови його наявності в достатній кількості формується керуючий вплив на збільшення генерації електричної енергії. У разі відсутності резерву активної потужності система керування забезпечує перехід до структурного управління топологією електроенергетичної системи шляхом логіко-аналітичного перебору можливих варіантів її структури. Стратегія керування балансом потужності та частоти визначається в залежності від величини збурення та наявності резерву потужності. Вибір найкращої структури системи забезпечується на основі функціоналу критерію якості, який враховує функціональні показники спроможності елементів та технічний показник якості їх функціонування. Удосконалений метод структурно-параметричного управління балансом потужності та частоти забезпечує автоматичний пошук найкращої стратегії керування щодо регулювання або зміни структури електроенергетичної системи залежно від дії проєктних та позапроєктних збурень.

– Розроблено динамічну модель управління балансом потужності та частоти електроенергетичної системи в результаті дії проєктних та позапроєктних збурень. Динамічна модель електроенергетичної системи розроблена в середовищі MATLAB Simulink (№13709940) шляхом поєднання фізико-математичних моделей її основних елементів, а саме: генеруючої станції, трансформаторної підстанції, лінії електропередачі та споживача з урахуванням контурів первинного та вторинного регулювання потужності. Динамічна модель дала можливість проаналізувати реакцію первинного та вторинного регулювання потужності в результаті дії проєктних

збурень та оцінити вплив зміни структури системи на баланс потужності та частоти в результаті дії позапроектних збурень.

– У четвертому розділі «Результати імітаційного моделювання автоматизованого управління балансом потужності та частоти електроенергетичної системи в результаті дії проектних та позапроектних збурень» досягнуто мету дисертаційного дослідження, а саме:

– Запропоновано метод оцінки ефективності поставки електричної енергії за узагальненим критерієм згортки частинних критеріїв. Узагальнений критерій згортки сформовано на основі трьох частинних критеріїв, що характеризують об'єм, якість та ефективність поставки електричної енергії з урахуванням можливості її купівлі та продажу за банківською системою у разі дефіциту або надлишку. Критерії ефективності поставки електричної енергії оцінюються на основі методу згортки частинних критеріїв з відстанню до ідеальної точки за нормою L_2 , де частинні критерії прийнято рівнозначними, а за ідеальну точку прийнято фіктивну точку в евклідовому просторі, в якій кожен критерій набуває свого екстремуму. Це дало можливість перейти від окремого аналізу критерію об'єму, критерію якості та критерію ефективності поставки електричної енергії до формування єдиного узагальненого критерію, за допомогою якого виконується оцінка ефективності поставки електричної енергії для різних режимів роботи електроенергетичної системи.

– Проведено моделювання автоматизованого структурно-параметричного управління балансом потужності та частоти в результаті дії проектних та позапроектних збурень. Математичне моделювання виконано в середовищі MATLAB Simulink (№13709940) на основі розробленої динамічної моделі електроенергетичної системи для чотирьох режимів роботи, що відображають роботу параметричного регулювання потужності та частоти при дії проектних збурень та зміну структури системи в результаті дії позапроектних збурень. Отримані результати підтвердили працездатність запропонованого автоматизованого структурно-параметричного управління балансом потужності та частоти в електроенергетичній системі.

Ключові слова: математичне моделювання, електрична енергія, надійність енергетичного обладнання, імітаційне моделювання, автоматизована система

керування, регулювання потужності, фізико-математична модель, критерії ефективності, синтез систем, система керування, функціонал критерію якості, стратегія керування, Simulink, моделювання, динамічна модель.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Кривда, В. І., Рудницький, В. Г., Суворов, В. О. & Зубак, В. В. (2022). Підвищення ефективності роботи сонячних панелей при використанні МРРТ-контролера. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 36(112), 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

2. Kryvda, V., Suvorov, V. & Zubak, V. (2023). Modeling and method for assessing the efficiency of the power system. Herald of Advanced Information Technology, 6(3), 240–249. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.16>. (SCOPUS).

3. Суворов, В. О. & Зубак, В. В. (2023). Модель для моніторингу та оцінки ефективності електроенергетичної системи країни. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 38(114), 15–21.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.2>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

4. Babych, S., Kryvda, V., Zhanko, K., Zubak, V. & Suvorov, V. (2023). Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure, Energy Engineering and Control Systems, 9(2), 119–130. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.119>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

5. Кривда, В. І., Зубак, В. В. & Максимов, М. М. (2024). Модель збереження працездатності електроенергетичної системи за умови її небалансу. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 40(116), 13–24.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.40.116.2024.2>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

6. Kryvda, V., Maksymov, M., Zubak, V., Ivaneiev, A. & Ryaboshapka, R. (2024). Development of the model and improvement of the method of automated control of steam turbine parameters to minimize the power imbalance in the energy system to increase its efficiency. *Technology Audit and Production Reserves*, 5, 1(79), 19–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314219>. (SCOPUS).

7. Zubak, V., Kipriianov, I. & Filippov, Y. (2024). Model of automated control of the electric power system to ensure reliability and efficiency of power supply in the event of disturbances and imbalances. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2(70), 108–122. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.13>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Панін, В., Зубак, В., Белоусов, В., & Кіпріяннов, І. (2023). Технологічні основи автоматизованого керування властивостями ядерного палива. *Grail of Science*, (32), 158–165. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.13.10.2023.028>.

9. Зубак, В. (2026). Інформаційна модель електроенергетичної системи на базі об'єктно-орієнтованого аналізу. *International Experience in Scientific Research*, Чикаго, США, 160–164.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/INTERNATIONAL-EXPERIENCE-IN-SCIENTIFIC-RESEARCH-19-21.03.26.pdf>.

10. Зубак, В. (2026). Збереження працездатності електроенергетичної системи в результаті дії збурень та умов небалансу. *Science And Education: Synergy Of Innovation*, Берлін, Німеччина, 169–175. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/SCIENCE-AND-EDUCATION-SYNERGY-OF-INNOVATION-23-25.03.26.pdf>.

11. Зубак, В. (2026). Розробка математичної моделі регулювання потужності та частоти в електроенергетичній системі. *Innovations Of Modern Science And Education*, Ванкувер, Канада, 138–143. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/INNOVATIONS-OF-MODERN-SCIENCE-AND-EDUCATION-26-28.03.26.pdf>.

12. Зубак, В. & Кривда, В. (2026). Розроблення комплексної імітаційної моделі електроенергетичної системи. *Innovation And Development In World Science*, Цюрих, Швейцарія, 199–204. URL: <https://conf-sci.com/wp-content/uploads/2026/03/INNOVATION-AND-DEVELOPMENT-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.03.26.pdf>.

13. Зубак, В. & Кривда, В. (2026). Удосконалення методу автоматичного структурно-параметричного управління балансом потужності та частоти ЕЕС в умовах проєктних та позапроєктних збурень. *Science, Technology And Global Challenges*, Токіо, Японія, 202–207. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/SCIENCE-TECHNOLOGY-AND-GLOBAL-CHALLENGES-2-4.04.26.pdf>.

14. Зубак, В. & Кривда, В. (2026). Розроблення динамічної моделі ЕЕС для управління балансу потужності та частоти в результаті дії проєктних та позапроєктних збурень. *European Science And Innovation Congress*, Барселона, Іспанія, 171–179.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/EUROPEAN-SCIENCE-AND-INNOVATION-CONGRESS-6-8.04.26.pdf>.

15. Зубак, В. & Кривда, В. (2026). Розроблення методу оцінки ефективності поставки електричної енергії за узагальненим критерієм згортки. *Modern Science: Trends, Challenges, Solutions*, Ліверпуль, Великобританія, 128–137. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/MODERN-SCIENCE-TRENDS-CHALLENGES-SOLUTIONS-9-11.04.26.pdf>.

ABSTRACT

Zubak V. V. Models and methods of automated control of the power and frequency balance of the electric power system to increase its efficiency under the conditions of design and off-design disturbances. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 – Automation and Computer-Integrated Technologies. – National University "Odesa Polytechnic" Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2026.

The dissertation is devoted to increasing the efficiency of the functioning of the electric power system under the conditions of design and off-design disturbances by developing complex simulation and dynamic models, as well as improving the method of automated structural-parametric control of the power and frequency balance. To achieve this goal, the work has developed a comprehensive simulation model of the electric power system, which consists of structural, object-oriented, mathematical, stochastic and tabular models for formalizing system elements, information and physical flows, changes in parameters and states of elements as a result of the action of design and non-design disturbances. The method of automated structural-parametric control has been improved and a dynamic model of power and frequency balance control in the electric power system as a result of the action of design and non-design disturbances has been developed. A method for assessing the efficiency of electrical energy supply under different system operating modes has been proposed.

Chapter 1, "Analysis of existing methods, models and control strategies for power and frequency balance in the electric power system under design-basis and beyond-design disturbances", the following was carried out", the following was done.

– The process of controlling active generating power has been defined as a control object for solving the problems of ensuring the balance of power and frequency, since a change in active power directly affects the frequency deviation and disruption of the normal operation of the electric power system.

– Existing models and methods of frequency and power control are considered, namely: primary frequency control by instantaneous deviation and secondary frequency

control by integral deviation. It is established that power regulation and frequency regulation by instantaneous deviation is characterized by a fast response and is aimed at maintaining the frequency, however, its stable residual deviation is preserved. Power regulation and frequency regulation by integral deviation combines the fast response of control by instantaneous deviation and forms an additional control effect proportional to the accumulated frequency deviation over time, which ensures the elimination of the stable residual frequency deviation.

– It has been established that the management of the topology of the power system structure is performed mainly by operational personnel in accordance with the dispatcher's commands, which indicates the lack of automated management of the system structure and the need to improve existing parametric control methods. The automated control system for power and frequency balance management system should provide both parametric regulation and structural management of the topology of the power system depending on the magnitude of the disturbance. This necessitates the formalization of the choice of the best power system structure based on the quality criterion functionality.

– Existing types of models for the possibility of studying the operation of the electric power system are considered. The need to develop a comprehensive simulation model of the electric power system is established, which combines object-oriented, mathematical, stochastic, tabular and structural models for formalizing system objects, information and physical flows between them with the use of information technologies, assessing the state of elements and determining energy equipment reliability under the influence of design and non-design disturbances.

– The impact of design and non-design disturbances and their consequences in world practice were analyzed;

Chapter 2, " Comprehensive simulation model and modeling of the electric power system " the following results were obtained.

– A comprehensive simulation model was developed based on five types of models, namely: structural, object-oriented, stochastic, mathematical and tabular models, which provided the opportunity, thanks to information technologies, to formalize system elements, information and physical flows, changes in parameters and states of elements, as well as to

perform simulation modelling of the electric power system as a result of the action of design and non-design disturbances. Based on object-oriented analysis, the main objects of the electric power system were determined as abstractions of real-world objects, their attributes and relationships. Using mathematical modeling, a description of objects characterizing the system operation mode was performed based on the physical quantities of active and reactive power, voltage, active power losses and voltage losses. The physical and mathematical model provided a combination of element parameters and processes of change in active power, frequency and voltage. The stochastic model provided consideration of the probabilistic nature of element failures, which made it possible to assess energy equipment reliability and the power system under the conditions of design and non-design disturbances. Using the tabular model, parameters, calculated indicators and states of elements were recorded for further calculation of the power system operating mode. The structural model ensured system synthesis of a system for a comprehensive description of the power system by integrating object-oriented, stochastic, mathematical and tabular models into a single comprehensive simulation model, which made it possible to perform simulation modelling, formalize system elements, information and physical flows, changes in their parameters and states, for further analysis of the power system operating mode and power and frequency balance management.

Chapter 3, "Model and method of automated control of the power and frequency balance of the electric power system under the influence of design and off-design disturbances" provides the following results.

– The method of automated structural-parametric control of the power and frequency balance as a result of the action of design and non-design disturbances has been improved. The method has been improved by system synthesis that combines parametric control of the power and frequency balance with structural control of the topology of the electric power system, which ensured the formation of a single method of automated structural-parametric control. The proposed control system provides analysis of the frequency deviation from the nominal value and verification of the active power balance in the electric power system. In the case of a surplus of active power, a control effect is formed to reduce the generation of electrical energy. In the opposite case, the automated control system performs a check of

the available active power reserve, and provided that it is available in sufficient quantities, a control effect is formed to increase the generation of electrical energy. In the absence of an active power reserve, the control system provides a transition to structural control of the topology of the electric power system by logical-analytical search of possible variants of its structure. The power and frequency balance control strategy is determined depending on the magnitude of the disturbance and the availability of a power reserve. The choice of the best system structure is ensured based on the quality criterion functionality, which takes into account the functional indicators of the elements' capacity and the technical indicator of the quality of their functioning. The improved method of structural-parametric power and frequency balance control provides an automatic search for the best control strategy for regulating or changing the structure of the electric power system depending on the action of design and non-design disturbances.

– A dynamic model of power and frequency balance management of the electric power system as a result of the action of design and non-design disturbances has been developed. The dynamic model of the electric power system was developed in the MATLAB Simulink environment (№13709940) by combining physical and mathematical models of its main elements, namely: a generating station, a transformer substation, a power transmission line and a consumer, taking into account the primary and secondary power regulation loops. The dynamic model made it possible to analyze the response of primary and secondary power regulation as a result of the action of design disturbances and to assess the impact of changes in the system structure on the power and frequency balance as a result of the action of non-design disturbances.

In Chapter 4, "Results of simulation modelling of automated power and frequency balance control of the electric power system as a result of design and off-design disturbances" the objective of the dissertation was achieved, namely.

– A method for assessing the efficiency of electrical energy supply using a generalized criterion of convolution of partial criteria is proposed. The generalized convolution criterion is formed on the basis of three partial criteria that characterize the volume, quality and efficiency of electrical energy supply, taking into account the possibility of its purchase and sale through the banking system in the event of a deficit or surplus. The efficiency criteria

of electrical energy are assessed on the basis of the method of convolution of partial criteria with a distance to the ideal point according to the L_2 norm, where the partial criteria are assumed to be equivalent, and the ideal point is assumed to be a fictitious point in Euclidean space, in which each criterion acquires its extremum. This made it possible to move from a separate analysis of the volume criterion, the quality criterion and the efficiency criteria of electrical energy supply to the formation of a single generalized criterion, with the help of which the efficiency of electrical energy supply is assessed for different operating modes of the electric power system.

– Modeling of automated structural-parametric control of power and frequency balance as a result of design and off-design disturbances was carried out. Mathematical modeling was performed in the MATLAB Simulink environment (№13709940) based on the developed dynamic model of the electric power system for four operating modes, which reflect the operation of parametric power regulation and frequency regulation under the action of design disturbances and changes in the system structure as a result of the action of off-design disturbances. The results obtained confirmed the operability of the proposed automated structural-parametric control of power and frequency balance in the electric power system.

Keywords: mathematical modeling, electrical energy, energy equipment reliability, simulation modelling, automated control system, power regulation, physical and mathematical model, efficiency criteria, system synthesis, control system, quality criterion functionality, control strategy, Simulink, modeling, dynamic model.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE ACQUIRER

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Kryvda, V., Rudnitsky, V., Suvorov, V. & Zubak, V. (2022). Improving the efficiency of solar panels when using MPPT-controller. *Electrotechnic and Computer Systems*, 36(112), 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.36.112.2022.04>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

2. Kryvda, V., Suvorov, V. & Zubak, V. (2023). Modeling and method for assessing the efficiency of the power system. *Herald of Advanced Information Technology*, 6(3), 240–249. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.06.2023.16>. (SCOPUS).

3. Suvorov, V. & Zubak, V. (2023). Model for monitoring and evaluation of the effectiveness of the electric power system of the country. *Electrotechnic and Computer Systems*, 38(114), 15–21.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.2>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

4. Babych, S., Kryvda, V., Zhanko, K., Zubak, V. & Suvorov, V. (2023). Development of models and methods for automated control of heat supply system with optimization of technical means structure, *Energy Engineering and Control Systems*, 9(2), 119–130. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.02.119>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

5. Kryvda, V., Zubak, V. & Maksymov, M. (2024). Model for maintaining the operability of the power system under conditions of its imbalance. *Electrical and Computer Systems*. 40(116), 13–24.

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.40.116.2024.2>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

6. Kryvda, V., Maksymov, M., Zubak, V., Ivaneiev, A. & Ryaboshapka, R. (2024). Development of the model and improvement of the method of automated control of steam turbine parameters to minimize the power imbalance in the energy system to increase its efficiency. *Technology Audit and Production Reserves*, 5, 1(79), 19–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314219>. (SCOPUS).

7. Zubak, V., Kipriianov, I. & Filippov, Y. (2024). Model of automated control of the electric power system to ensure reliability and efficiency of power supply in the event of disturbances and imbalances. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 2(70), 108–122. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.13>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

Publications of an approbatory nature:

8. Panin, V., Zubak, V., Belousov, V., & Kipriyanov, I. (2023). Technological foundations of automated control of nuclear fuel properties. *Grail of Science*, (32), 158–165. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.13.10.2023.028>.

9. Zubak, V. (2026). Information model of the electric power system based on object-oriented analysis. *International Experience in Scientific Research*, Chicago, USA, 160–164.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/INTERNATIONAL-EXPERIENCE-IN-SCIENTIFIC-RESEARCH-19-21.03.26.pdf>.

10. Zubak, V. (2026). Preservation of the operability of the electric power system as a result of the action of disturbances and imbalance conditions. *Science And Education: Synergy Of Innovation*, Berlin, Germany, 169–175. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/SCIENCE-AND-EDUCATION-SYNERGY-OF-INNOVATION-23-25.03.26.pdf>.

11. Zubak, V. (2026). Development of a mathematical model of power and frequency control in the electric power system. *Innovations Of Modern Science And Education*, Vancouver, Canada, 138–143. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/03/INNOVATIONS-OF-MODERN-SCIENCE-AND-EDUCATION-26-28.03.26.pdf>.

12. Zubak, V. & Kryvda, V. (2026). Development of a comprehensive simulation model of the electric power system. *Innovation And Development In World Science*, Zurich, Switzerland, 199–204.

URL: <https://conf-sci.com/wp-content/uploads/2026/03/INNOVATION-AND-DEVELOPMENT-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.03.26.pdf>.

13. Zubak, V. & Kryvda, V. (2026). Improvement of the method of automatic structural-parametric control of the power and frequency balance of the electric power system under the conditions of design and non-design disturbances. *Science, Technology And Global Challenges*, Tokyo, Japan, 202–207. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/SCIENCE-TECHNOLOGY-AND-GLOBAL-CHALLENGES-2-4.04.26.pdf>.

14. Zubak, V. & Kryvda, V. (2026). Development of a dynamic model of the electric power system for power and frequency balance control as a result of design and non-design disturbances. European Science And Innovation Congress, Barcelona, Spain, 171–179.

URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/EUROPEAN-SCIENCE-AND-INNOVATION-CONGRESS-6-8.04.26.pdf>.

15. Zubak, V. & Kryvda, V. (2026). Development of a method for assessing the efficiency of electricity supply using the generalized convolution criterion. Modern Science: Trends, Challenges, Solutions, Liverpool, UK, 128–137. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/MODERN-SCIENCE-TRENDS-CHALLENGES-SOLUTIONS-9-11.04.26.pdf>.