

АНОТАЦІЯ

Яворський Олександр Володимирович. Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами. – Кваліфікаційна наукова праця 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 вирішенню науково-прикладної задачі підвищення ефективності та надійності енергосистеми, а також стійкості частотного регулювання в гібридних енергосистемах з газотурбінними установками та акумуляторними накопичувачами енергії. Робота розглядає сучасні системи управління та автоматичні системи управління енергетичними об'єктами в умовах зростаючих вимог до надійного енергопостачання. Актуальність роботи зумовлена необхідністю адекватного математичного опису динамічних властивостей газотурбінних установок для задач автоматизації та управління, ускладненням процесів частотного регулювання в багатомашинних енергосистемах, а також зниженням інерційності сучасних енергосистем і потребою підвищення їх динамічної та аварійної стійкості за рахунок інтеграції акумуляторних систем зберігання енергії. Існуючі підходи не забезпечують комплексного врахування взаємодії динамічних процесів у газотурбінних агрегатах, включаючи процеси з участю допоміжних газів, особливостей розподілу регульовальних впливів та обмежень акумуляторних накопичувачів, що зумовлює необхідність розроблення узагальнених моделей і методів керування. З цією метою в дисертації поставлено задачу підвищення ефективності та надійності частотного регулювання шляхом створення узагальнених динамічних моделей газотурбінних установок, розроблення імітаційних моделей багатомашинних енергосистем, удосконалення методів розподілу регульовальних впливів та обґрунтування ієрархічних структур

керування гібридними енергосистемами з урахуванням обмежень акумуляторних накопичувачів у межах концепції модельно-орієнтованого проектування.

У першому розділі «Аналіз існуючих методів автоматизованого керування та автоматичних систем управління частотними режимами газотурбінних енергосистем з урахуванням надійності енергосистеми, надійного енергопостачання та нормованих показників якості» одержано такі результати:

- виконано аналіз математичних моделей газотурбінних установок та встановлено, що існуючі підходи або мають надмірну складність, або не забезпечують достатньої адекватності при дослідженні перехідних процесів, що зумовлює необхідність розроблення узагальненої динамічної моделі із зосередженими параметрами;

- досліджено сучасні підходи до автоматизованого керування частотою в багатомашинних енергосистемах і виявлено обмеженість існуючих методів розподілу збурень, зокрема недостатнє врахування динамічних характеристик установок, їх можливостей до маневрування потужністю і знаку збурення;

- проаналізовано методи підвищення динамічної та аварійної стійкості енергосистем з акумуляторними накопичувачами та встановлено необхідність створення комплексних моделей і методів керування, що враховують обмеження накопичувачів і можливі деградовані режими роботи системи.

У другому розділі «Модельно-орієнтоване проектування та математичне моделювання газотурбінних установок зі зосередженими параметрами: динамічні моделі, моделі апроксимації, допоміжні гази та аналіз динамічних властивостей при змінній номінальній потужності» розроблено узагальнену динамічну модель газотурбінної установки, що відтворює основні фізичні процеси та забезпечує можливість дослідження перехідних режимів у широкому діапазоні навантажень.

- розроблена модель газотурбінної установки сформована на основі підходу зі зосередженими параметрами та включає взаємопов'язані підсистеми

ротора, камери згоряння та газових об'ємів, для яких отримано систему диференціальних рівнянь, що адекватно описує інерційні, теплові та масообмінні процеси при малих відхиленнях від робочої точки;

– удосконалено підхід до параметризації динамічної моделі шляхом узагальнення результатів імітаційного моделювання та отримання моделей апроксимації у вигляді залежностей коефіцієнтів моделі і параметрів перехідних процесів від номінальної потужності установки;

– отримані результати забезпечили можливість масштабування моделі для установок різної потужності та підвищення точності дослідження динамічних режимів роботи газотурбінних установок у складі енергосистем, а також створили основу для її використання в задачах синтезу систем автоматичного регулювання.

У третьому розділі «Імітаційна автоматична система управління (система керування) частотою гібридної енергосистеми з газотурбінними установками та дослідження процесів маневрування потужністю» розроблено імітаційну модель багатомашинної енергосистеми та виконано дослідження впливу режимів роботи установок і стратегій розподілу збурень на нормовані показники якості частотного регулювання як елементів системи стабілізації.

– розроблена імітаційна модель включає уніфіковані параметризовані динамічні моделі газотурбінних установок зі змінними параметрами, об'єднані спільним частотним контуром, а також реалізовані алгоритми розподілу збурень активної потужності з урахуванням взаємного динамічного впливу агрегатів у багатомашинній системі;

– удосконалено систему керування частотним режимом шляхом комплексного дослідження впливу режимів роботи газотурбінних установок (навантаження, гарячий резерв) і стратегій розподілу збурень, що дозволило встановити визначальну роль регульованих агрегатів та виявити залежність ефективності стратегій керування від умов функціонування системи;

– отримані результати дозволили обґрунтувати доцільність адаптивного перемикання стратегій розподілу збурень активної потужності залежно від знаку дисбалансу, що забезпечує підвищення якості та надійності частотного регулювання в багатомашинній енергосистемі.

У четвертому розділі «Моделі та алгоритми автоматизації управління частотним регулюванням енергосистем з газотурбінними та акумуляторними установками з підвищеною надійністю системи стабілізації» розроблено математичні та імітаційні моделі і методи структурного синтезу системи первинного частотного регулювання.

– розроблена узагальнена модель гібридної енергосистеми включає газотурбінні установки та акумуляторні накопичувачі енергії, інтегровані у спільний контур первинного частотного регулювання, з урахуванням динаміки накопичувача, обмежень за станом заряду, потужністю та енергетичною ємністю;

– удосконалено структуру автоматизованої системи керування шляхом реалізації ієрархічного принципу розподілу функцій між швидкодіючим акумуляторним каналом і інерційними газотурбінними установками, а також впровадження алгоритмів відновлення енергетичного стану накопичувача та аналізу альтернативних (паралельних і комбінованих) структур керування;

– отримані результати забезпечили підвищення динамічної та аварійної частотної стійкості гібридної енергосистеми, зменшення глибини та швидкості відхилень частоти в перехідних процесах, підвищення ефективності використання акумуляторних накопичувачів у контурі первинного регулювання, а також надійності енергосистеми.

Отже, отримані результати забезпечили досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження та підвищення ефективності функціонування сучасних автоматизованих енергетичних систем.

Ключові слова: система управління, модельно-орієнтоване проектування, динамічна модель, автоматизація, управління, автоматична система управління,

маневрування потужністю, модель апроксимації, допоміжні газу, надійність енергосистеми, надійність, надійне енергопостачання, система стабілізації, система керування, нормовані показники якості

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Konstantin V. Beglov; Victoria I. Kryvda; Oleksandr A. Klymchuk; Vladyslav R. Zhukovskiy; Oleksandr V. Yavorskiy; Gennady Io. Galanter Comparison of mathematical models of power generation equipment in transient process simulation in energy systems ELECTRICAL AND COMPUTER SYSTEMS 2025 DOI: 10.15276/eltecs.42.118.2025.4; URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3302>
2. Олександр Володимирович Яворський; Ольга Сергіївна Тарахтій; Владислав Русланович Жуковський; Віктор Олександрович Панін Analysis of the distribution of gas turbine unit operation modes as a tool for improving the stability of the power system Technology audit and production reserves 2024-12-31 DOI: 10.15587/2706-5448.2024.320229
3. Taia Petik; Mykhaylo Lobachev; Oleksandr Yavorskiy; Vitalii Holey, Automatic control system for changing the power of a nuclear power unit 2023-11-28, Electrical And Computer Systems, DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.5>; URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3254>
4. Olga Tarakhtiy; Vladyslav Zhukovskiy; Andrii Ivaneiev; Oleksandr Yavorskiy; Danylo Shuvalov Аналіз теплових схем і динамічних властивостей когенераційної енергетичної установки за умови використання несиртифікованих видів палива International Science Journal of Engineering & Agriculture 2023-10-01 DOI: 10.46299/j.isjea.20230205.02

5. O. Yavorskyi, O. Tarakhtii, M. Maksymov, V. Kryvda. Model of gas turbine plant with concentrated parameters for analysis of dynamic properties patterns. *Energy Engineering and Control Systems*, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 105 – 118. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.105>

6. Яворський О.В., Тарахтій О.С. Вплив стратегії первинного та вторинного регулювання на частотну стабільність гібридної енергосистеми Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 36 (75) № 5 частина 2, 2025 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/43>; URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=158>

7. Яворський О.В., Тарахтій О.С., Грішин П.І Порівняльне дослідження стратегій частотного регулювання газотурбінної системи в умовах аварійних збурень Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 37 (76) № 1 частина 2 2026 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/58>; URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=164>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Яворський О.В. Модель газотурбінної установки зі зосередженими параметрами для аналізу динамічних властивостей. V Міжнародна науково-практична конференція “Innovation And Development In World Science”, 2-4.03.2026, Цюрих, Швейцарія. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-2-4-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

9. Яворський О.В. Розподіл режимів роботи газотурбінних установок як фактор впливу на якість частотного регулювання енергосистеми. VI Міжнародна науково-практична конференція “Innovation And Development In World Science”, 29-31.03.2026, Цюрих, Швейцарія. . URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-29-31-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

10. Яворський О.В. Порівняльний аналіз методів розподілу збурень потужності в енергосистемі з газотурбінними установками. VI Міжнародна науково-практична конференція “Innovation And Development In World Science”, 29-31.03.2026, Цюріх, Швейцарія. . URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-29-31-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

11. Яворський О.В. Апроксимаційна залежність зміни постійної часу гту від поточної потужності. VI Міжнародна науково-практична конференція “Innovation And Development In World Science”, 29-31.03.2026, Цюріх, Швейцарія. . URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-29-31-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

ABSTRACT

Yavorskyi Oleksandr Volodymyrovych. Models of automated control of frequency modes of gas turbine power systems with batteries. – Qualification scientific work as a manuscript.

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

The dissertation is devoted to solving a scientific and applied problem of improving the efficiency and reliability of power systems, as well as the stability of frequency control in hybrid power systems with gas turbine units and battery energy storage systems. The work considers modern control systems and automatic control systems of power facilities under conditions of increasing requirements for reliable power supply. The relevance of the work is determined by the need for an adequate mathematical description of the dynamic properties of gas turbine units for automation and control tasks, the increasing complexity of frequency regulation processes in multi-

machine power systems, as well as the reduction of inertia in modern power systems and the need to improve their dynamic and emergency stability through the integration of battery energy storage systems. Existing approaches do not provide a comprehensive account of the interaction of dynamic processes in gas turbine units, including processes involving auxiliary gases, the features of distributing control actions, and the limitations of battery storage systems, which necessitates the development of generalized models and control methods. For this purpose, the dissertation sets the task of improving the efficiency and reliability of frequency control by developing generalized dynamic models of gas turbine units, simulation models of multi-machine power systems, improving methods for distributing control actions, and substantiating hierarchical control structures of hybrid power systems considering the limitations of battery storage systems within the concept of model-based design.

In the first section, “Analysis of existing methods of automated control and automatic control systems of frequency modes of gas turbine power systems considering power system reliability, reliable power supply, and standardized quality indicators,” the following results were obtained:

- an analysis of mathematical models of gas turbine units was carried out, and it was established that existing approaches are either overly complex or do not provide sufficient adequacy in transient studies, which necessitates the development of a generalized dynamic model with lumped parameters;

- modern approaches to automated frequency control in multi-machine power systems were studied, and the limitations of existing disturbance distribution methods were identified, in particular insufficient consideration of the dynamic characteristics of units, their capability for power maneuvering, and the sign of the disturbance;

- methods for improving the dynamic and emergency stability of power systems with battery storage were analyzed, and the need for developing comprehensive models and control methods that consider storage limitations and possible degraded operating modes was established.

In the second section, “Model-based design and mathematical modeling of gas turbine units with lumped parameters: dynamic models, approximation models, auxiliary gases, and analysis of dynamic properties at variable rated power,” a generalized dynamic model of a gas turbine unit was developed, which reproduces the main physical processes and enables the study of transient modes over a wide range of loads.

- the developed model of the gas turbine unit is based on a lumped-parameter approach and includes interconnected subsystems of the rotor, combustion chamber, and gas volumes, for which a system of differential equations was obtained that adequately describes inertial, thermal, and mass transfer processes under small deviations from the operating point;

- the approach to parameterization of the dynamic model was improved by generalizing simulation results and obtaining approximation models in the form of dependencies of model coefficients and transient process parameters on the rated power of the unit;

- the obtained results made it possible to scale the model for units of different capacities and improve the accuracy of studying dynamic operating modes of gas turbine units within power systems, as well as provided a basis for its application in automatic control system synthesis.

In the third section, “Simulation automatic control system (control system) of frequency of a hybrid power system with gas turbine units and study of power maneuvering processes,” a simulation model of a multi-machine power system was developed, and the influence of operating modes and disturbance distribution strategies on standardized quality indicators of frequency control as elements of a stabilization system was studied.

- the developed simulation model includes unified parameterized dynamic models of gas turbine units with variable parameters, combined by a common frequency

loop, as well as implemented algorithms for distributing active power disturbances considering the mutual dynamic influence of units in a multi-machine system;

- the control system of the frequency mode was improved through a comprehensive study of the influence of operating modes of gas turbine units (load, spinning reserve) and disturbance distribution strategies, which made it possible to determine the decisive role of controlled units and reveal the dependence of control strategy efficiency on system operating conditions;

- the obtained results substantiated the feasibility of adaptive switching of disturbance distribution strategies depending on the sign of imbalance, which ensures improved quality and reliability of frequency control in a multi-machine power system.

In the fourth section, “Frequency control of a hybrid power system with gas turbine units and battery electrical systems as a stabilization system with increased reliability and efficient automation of control,” mathematical and simulation models and methods for structural synthesis of the primary frequency control system were developed.

- the developed generalized model of the hybrid power system includes gas turbine units and battery energy storage systems integrated into a common primary frequency control loop, considering storage dynamics, state-of-charge limitations, power, and energy capacity constraints;

- the structure of the automated control system was improved by implementing a hierarchical principle of function distribution between a fast-acting battery channel and inertial gas turbine units, as well as introducing algorithms for restoring the energy state of the storage and analyzing alternative (parallel and combined) control structures;

- the obtained results ensured an increase in dynamic and emergency frequency stability of the hybrid power system, a reduction in the depth and rate of frequency deviations in transient processes, an increase in the efficiency of battery storage use in the primary control loop, as well as an improvement in power system reliability.

Thus, the obtained results ensured the achievement of the goal of the dissertation research and improved the efficiency of functioning of modern automated power systems.

Keywords: control system, model-based design, dynamic model, automation, control, automatic control system, power maneuvering, approximation model, auxiliary gases, power system reliability, reliability, reliable power supply, stabilization system, control system, standardized quality indicators.

LIST OF PUBLICATIONS BY THE ACQUIRER

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

1. Konstantin V. Beglov; Victoria I. Kryvda; Oleksandr A. Klymchuk; Vladyslav R. Zhukovskiy; Oleksandr V. Yavorskiy; Gennady Io. Galanter. Comparison of Mathematical Models of Power Generation Equipment in Transient Process Simulation in Energy Systems. *Electrical and Computer Systems*, 2025. DOI: 10.15276/eltecs.42.118.2025.4 URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3302>
2. Oleksandr V. Yavorskiy; Olha S. Tarakhtii; Vladyslav R. Zhukovskiy; Viktor O. Panin. Analysis of the Distribution of Gas Turbine Unit Operating Modes as a Tool for Improving Power System Stability. *Technology Audit and Production Reserves*, 2024. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.320229
3. Taia Petik; Mykhaylo Lobachev; Oleksandr Yavorskiy; Vitalii Holey. Automatic Control System for Power Variation of a Nuclear Power Unit. *Electrical and Computer Systems*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.38.114.2023.5> URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3254>
4. Olga Tarakhtii; Vladyslav Zhukovskiy; Andrii Ivaneiev; Oleksandr Yavorskiy; Danylo Shuvalov. Analysis of Thermal Schemes and Dynamic Properties of a Cogeneration Power Plant under the Use of Non-Certified Fuels. *International*

Science Journal of Engineering & Agriculture, 2023. DOI: 10.46299/j.isjea.20230205.02

5. O. Yavorskyi; O. Tarakhtii; M. Maksymov; V. Kryvda. Model of a Gas Turbine Plant with Concentrated Parameters for Analysis of Dynamic Properties. Energy Engineering and Control Systems, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 105–118. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2023.02.105>

6. O. V. Yavorskyi; O. S. Tarakhtii. Influence of Primary and Secondary Control Strategies on the Frequency Stability of a Hybrid Power System. Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences, 2025, Vol. 36 (75), No. 5, Part 2. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/43> URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=158>

7. O. V. Yavorskyi; O. S. Tarakhtii; P. I. Hrishyn. Comparative Study of Frequency Control Strategies for a Gas Turbine System under Emergency Disturbances.

Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences, 2026, Vol. 37 (76), No. 1, Part 2. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/58> URL: <https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive?id=164>

Published works of an approbation nature:

8. O. V. Yavorskyi. Model of a Gas Turbine Unit with Concentrated Parameters for Dynamic Properties Analysis. V International Scientific and Practical Conference “Innovation and Development in World Science”, March 2–4, 2026, Zurich, Switzerland. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-2-4-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

9. O. V. Yavorskyi. Distribution of Operating Modes of Gas Turbine Units as a Factor Affecting the Quality of Power System Frequency Control. VI International Scientific and Practical Conference “Innovation and Development in World Science”,

March 29–31, 2026, Zurich, Switzerland. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-29-31-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

10. O. V. Yavorskyi. Comparative Analysis of Methods for Power Disturbance Distribution in a Power System with Gas Turbine Units. VI International Scientific and Practical Conference “Innovation and Development in World Science”, March 29–31, 2026, Zurich, Switzerland. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-29-31-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>

11. O. V. Yavorskyi. Approximation Dependence of the Gas Turbine Unit Time Constant on Its Current Power Output. VI International Scientific and Practical Conference “Innovation and Development in World Science”, March 29–31, 2026, Zurich, Switzerland. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovation-and-development-in-world-science-29-31-03-2026-tsyurih-shvejtsariya-arhiv/>