

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента Маєвського Дмитра Андрійовича про науковий рівень дисертації і наукових публікацій здобувача Яворського Олександра Володимировича «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів дослідження

Наукова новизна теоретичних та експериментальних результатів дослідження представлена в опублікованих наукових періодичних виданнях а саме:

1. Konstantin V. Beglov, Victoria I. Kryvda, Oleksandr A. Klymchuk, Vladyslav R. Zhukovskyi, Oleksandr V. Yavorskyi, 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 Yavorskyi, Olha Tarakhtii, Vladyslav Zhukovskyi, Viktor Panin. 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 Yavorskyi, 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>;

4. Ольга Тарахтій, Владислав Жуковський, Андрій Іванєєв, Олександр Яворський, Данило Шувалов. 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/jeecs2023.02.105>

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>

Наукові результати, які опубліковані, відповідають основним науковим результатам, які представлено в роботі в якості наукової новизни. До них слід віднести наступне:

– удосконалено математичну модель газотурбінної установки шляхом врахування динаміки ротора, газових об'ємів, камери згоряння та параметризації залежно від номінальної потужності, що забезпечило адекватне відтворення перехідних процесів і можливість використання моделі для багатомашинних енергосистем;

– дістала подальшого розвитку імітаційна модель автоматизованої системи керування частотою гібридної енергосистеми з газотурбінними та акумуляторними установками, яка, на відміну від відомих, враховує динамічні властивості акумуляторної батареї, її енергетичні обмеження та взаємодію з газотурбінними агрегатами в контурі первинного частотного регулювання;

– запропоновано ієрархічний метод організації первинного частотного регулювання, що базується на пріоритетному використанні акумуляторної батареї як швидкодіючого регулюючого елемента з автоматичним відновленням її ступеня заряду за допомогою ПІ-регулятора, що дозволило підвищити якість регулювання та зменшити глибину циклування накопичувача;

– набув подальшого розвитку підхід до оцінювання ефективності структур первинного частотного регулювання шляхом комплексного аналізу нормованих показників якості, що дозволило обґрунтувати переваги використання акумуляторної системи зберігання енергії для підвищення динамічної та аварійної стійкості гібридної енергосистеми.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Рівень обґрунтованості наукових положень, сформульованих у дисертаційній роботі Яворського О.В., є достатнім і підтверджується як теоретичними, так і прикладними результатами дослідження. Побудова дослідження ґрунтується на послідовному узгодженні мети, поставлених завдань, методів дослідження та отриманих результатів, що забезпечує логічну цілісність і внутрішню узгодженість роботи. У процесі виконання дисертації використано сучасні методи математичного та імітаційного моделювання, теорії автоматичного керування, методи структурного синтезу систем керування, а також програмне середовище MATLAB Simulink для дослідження динамічних режимів роботи гібридних енергосистем.

Достовірність отриманих результатів підтверджується коректністю

побудованих математичних моделей, використанням загальновизнаних положень теорії електроенергетичних систем, газотурбінних установок та акумуляторних систем зберігання енергії, узгодженістю результатів моделювання з фізичними закономірностями перебігу електромеханічних процесів, а також проведенням численних імітаційних експериментів для нормальних і аварійних режимів роботи енергосистеми.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у розробленні математичних моделей та методів автоматизованого керування частотним регулюванням гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії, які, на відміну від існуючих підходів, враховують взаємний динамічний вплив газотурбінних агрегатів, залежність параметрів їх моделей від номінальної потужності та забезпечують інтеграцію швидкодіючих накопичувачів енергії безпосередньо в контур первинного частотного регулювання.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених математичних моделей, алгоритмів і структур автоматизованого керування під час проєктування та модернізації систем автоматичного регулювання частоти гібридних енергосистем, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Додатковим підтвердженням обґрунтованості отриманих результатів є їх відповідність цілям та завданням освітньо-наукової програми третього рівня вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тематика, зміст та результати дисертаційного дослідження повністю відповідають профілю підготовки докторів філософії, передбачаючи виконання самостійних наукових досліджень у галузі автоматизації, математичного моделювання та синтезу сучасних систем керування складними технічними об'єктами.

Наукові результати дисертаційної роботи відповідають програмним

предметним, фаховим та інноваційним компетентностям освітньо-наукової програми третього рівня вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», зокрема:

СК1. Здатність проводити моделювання об'єктів та систем керування.

СК2. Здатність проводити оцінку якості функціонування автоматизованих систем керування.

СК3. Знання та глибоке розуміння предметної області, розуміння професійної та наукової діяльності.

СК4. Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у сфері автоматизації та комп'ютерноінтегрованих технологій та дотичних до неї міждисциплінарних напрямів і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з автоматизації, комп'ютерних технологій, приладобудування та суміжних галузей.

СК5. Здатність усно і письмово презентувати та обговорювати результати наукових досліджень та/або інноваційних розробок українською та англійською мовами, глибоке розуміння англійських наукових текстів за напрямом досліджень.

СК6. Здатність застосовувати сучасні методи дослідження, синтезу, проєктування систем автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій, їх програмних та апаратних компонентів, спеціалізоване програмне забезпечення у науковій та навчальній діяльності.

СК7. Здатність здійснювати науково-педагогічну діяльність у вищій освіті, дотримуватись етики досліджень, а також правил академічної доброчесності в наукових дослідженнях та науково-педагогічній діяльності.

СК8–СК23, що охоплюють компетентності щодо розроблення та впровадження автоматизованих систем, створення математичних моделей, алгоритмів керування, програмного забезпечення, моделювання

електромеханічних процесів, оцінювання надійності й ефективності технічних систем, застосування сучасних комп'ютерних технологій, реалізації інноваційних проєктів та формування системного наукового світогляду.

що повною мірою відображають здатність здобувача здійснювати моделювання та дослідження систем керування, оцінювати їх ефективність і надійність, розробляти математичні моделі, алгоритми та програмне забезпечення для автоматизованих систем керування, а також виконувати самостійні наукові дослідження й реалізовувати інноваційні проєкти у сфері автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Крім того, ступінь обґрунтованості наукових положень підтверджується послідовною реалізацією комплексу дослідницьких завдань, що були поставлені в межах теми дисертації, зокрема:

- провести аналіз сучасних математичних моделей газотурбінних установок, виявити суперечність між повнотою опису динамічних процесів і обчислювальною ефективністю моделей та сформулювати вимоги до узагальненої моделі, придатної для дослідження процесів частотного регулювання;

- розробити математичну модель газотурбінної установки, що враховує інерційні, теплові та газодинамічні процеси, а також отримати апроксимаційні

- залежності параметрів перехідних процесів від номінальної потужності установки для аналізу її динамічних характеристик;

- розробити імітаційну модель автоматизованої системи керування частотою гібридної енергосистеми з газотурбінними установками та дослідити вплив режимів роботи агрегатів і стратегій розподілу активної потужності на показники якості частотного регулювання, надійність енергосистеми й ефективність адаптивного перемикання алгоритмів керування;

- розробити математичні та імітаційні моделі, а також структуру

автоматизованої системи первинного частотного регулювання гібридної газотурбінної енергосистеми з акумуляторною системою зберігання енергії та дослідити її динамічну й аварійну частотну стійкість.

По дисертаційній роботі є наступні зауваження:

1. У першому розділі наведено достатньо широкий аналіз сучасних підходів до частотного регулювання, однак було б доцільно більш детально розглянути сучасні роботи щодо використання акумуляторних систем у складі гібридних енергосистем з високою часткою відновлюваної генерації.

2. Під час побудови математичної моделі газотурбінної установки у другому розділі доцільно було б більш детально обґрунтувати вибір окремих коефіцієнтів моделі та навести аналіз їх чутливості до зміни режимів роботи.

3. У третьому розділі бажано було б доповнити опис програмної реалізації моделі більш детальним поясненням окремих структурних блоків MATLAB Simulink для полегшення відтворення результатів іншими дослідниками.

4. При аналізі результатів моделювання у четвертому розділі було б корисно доповнити дослідження оцінкою впливу зміни ємності акумуляторної батареї на ефективність запропонованої структури частотного регулювання.

Наведені зауваження не знижують високий науковий рівень роботи та її наукову і практичну цінність, а скоріш носять характер рекомендації.

Рівень виконання поставленого наукового завдання

Рівень виконання поставленого наукового завдання є високим. Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності, надійності та стійкості частотного регулювання гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії. Для досягнення поставленої мети автором розроблено узагальнені математичні та імітаційні моделі газотурбінних установок, запропоновано моделі багатомашинної

енергосистеми, досліджено стратегії розподілу регулювальних впливів і синтезовано ієрархічну структуру автоматизованого керування із застосуванням акумуляторних накопичувачів енергії. Запропоновані рішення забезпечують підвищення якості перехідних процесів, покращення динамічної та аварійної частотної стійкості енергосистеми, а також більш ефективне використання газотурбінних агрегатів і накопичувачів енергії.

Повнота викладення результатів досліджень у наукових публікаціях за темою дисертації

Наукові результати дисертації достатньою мірою відображені у наукових публікаціях автора. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, з яких

7 статей у спеціалізованих наукових виданнях (у тому числі 1 стаття, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus) та 4 тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях. Обсяг і зміст публікацій повністю відображають основні положення, результати та наукову новизну дисертаційної роботи й відповідають вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Під час ознайомлення з дисертаційною роботою ознак порушення академічної доброчесності не виявлено. Наукові результати, викладені в роботі, підтверджуються опублікованими працями автора, виконані з дотриманням принципів академічної доброчесності та відповідають вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Крім того Яворським О. В. дотримано вимоги академічної доброчесності, що підтверджується протоколом програми StrikePlagiarism [ID 333638733] від 11.05.2026 року, який опрацьовано фахівцями кафедри Програмних і комп'ютерно інтегрованих технологій та членами групи забезпечення підготовки докторів філософії по ОНП за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», які зробили висновок, що дисертаційна

робота відповідає нормам академічної доброчесності.

Значимість отриманих результатів для практичного використання

Отримані результати мають вагоме практичне значення для задач автоматизації керування сучасними електроенергетичними системами. Розроблені математичні моделі, алгоритми та структури автоматизованого керування можуть бути використані під час проєктування, дослідження й модернізації систем первинного частотного регулювання електроенергетичних систем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії. Запропоновані підходи дозволяють підвищити якість частотного регулювання, покращити динамічну та аварійну стійкість енергосистем без суттєвої модернізації існуючого обладнання. Практичні результати роботи також впроваджено в освітній процес Національного університету «Одеська політехніка» під час підготовки здобувачів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШІР) на кафедрі «Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій» у межах викладання таких дисциплін, як «Автоматизація виробничих процесів», «Моделювання процесів і систем», «Сучасні системи керування» та «Оптимальні та адаптивні системи управління», що забезпечує практично орієнтовану підготовку здобувачів вищої освіти.

Зв'язок проведених здобувачем досліджень з планами, затверджених Міністерством освіти і науки України:

які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами:

– «Моделі та методи термодеструкції органічної сировини довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини», НДР № 253-47, (№ 0124U004588)

– «Розробка методів та моделей автоматизованого керування тепловою потужністю парових котлів при спалюванні сумішей вуглеводневих палив

змінного складу», НДР № 268-47 (№ 0125U004012).

Оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності

У процесі виконання дисертаційного дослідження на тему «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами» Яворський Олександр Володимирович продемонстрував високий рівень володіння методологією наукової діяльності, сучасними методами математичного та імітаційного моделювання, аналізу й синтезу автоматизованих систем керування, що відповідає освітньо-науковій програмі третього рівня вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

У ході виконання дисертаційної роботи здобувач самостійно здійснив постановку наукової проблеми, визначив мету та завдання дослідження, провів аналіз сучасного стану наукових досліджень у галузі автоматизованого керування енергосистемами, розробив математичні та імітаційні моделі газотурбінних установок і гібридних енергосистем з акумуляторними накопичувачами енергії, виконав комплекс досліджень перехідних процесів, обґрунтував структури автоматизованого керування та сформулював практичні рекомендації щодо їх використання.

Під час виконання роботи здобувач застосував сучасні методи системного аналізу, математичного моделювання, теорії автоматичного керування, модельно-орієнтованого проєктування, чисельного експерименту та комп'ютерного імітаційного моделювання. Це дозволило комплексно дослідити динамічні процеси в газотурбінних енергосистемах, встановити закономірності впливу різних структур керування та стратегій розподілу регулювальних впливів на показники частотної стійкості, а також обґрунтувати ефективність використання акумуляторних накопичувачів енергії в системах первинного частотного регулювання.

Отримані результати свідчать про сформованість у здобувача системного наукового мислення, здатності виконувати комплексні міждисциплінарні

дослідження у сфері автоматизації енергетичних систем, розробляти нові математичні моделі, алгоритми та структури автоматизованого керування, а також здійснювати їх експериментальне дослідження засобами сучасних програмних комплексів.

Належний рівень аналітичних, дослідницьких, проєктних та інженерних компетентностей забезпечив досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження та підтвердив відповідність виконаної роботи вимогам освітньо-наукової програми третього рівня вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Отримані результати повною мірою відповідають програмним результатам навчання, фаховим та дослідницьким компетентностям зазначеної освітньо-наукової програми.

Висновок

Дисертаційна робота Яворського Олександра Володимировича «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають істотне значення для розвитку теорії та практики автоматизованого керування сучасними електроенергетичними системами.

Науковий рівень, зміст і повнота дисертаційної роботи відповідають вимогам пунктів 7, 8 та 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року зі змінами, оскільки наведені в ній результати у сукупності вирішують актуальне науково-прикладне завдання, що полягає в удосконаленні моделей, методів та структур автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторними системами зберігання енергії з метою підвищення ефективності, надійності, динамічної та аварійної стійкості

функціонування сучасних електроенергетичних систем.

Розроблені математичні та імітаційні моделі газотурбінних установок, модель багатомашинної гібридної енергосистеми, методи розподілу регулювальних впливів і структурного синтезу автоматизованих систем керування створюють науково-практичну основу для подальшого розвитку модельно-орієнтованого проектування систем автоматичного керування енергетичними об'єктами та впровадження сучасних акумуляторних систем у контур первинного частотного регулювання.

Вважаю, що автор дисертаційної роботи «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами» Яворський Олександр Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Офіційний рецензент

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри електромеханічної
інженерії, Національний університет
«Одеська політехніка»



Дмитро МАЄВСЬКИЙ