

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента Брунеткіна Олександра Івановича на 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»

Наукова новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів дослідження

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати, що розв'язують актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності та надійності автоматизованого керування частотними режимами гібридних енергосистем з газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії.

До основних наукових результатів, що визначають новизну дисертаційного дослідження, належать:

- вперше запропоновано метод динамічного моделювання газотурбінної установки, який враховує інерційні властивості ротора, теплові процеси в камері згоряння, акумулюючі властивості газових об'ємів та вплив допоміжних газів, що дало змогу отримати апроксимаційні залежності параметрів перехідних процесів від номінальної потужності установки й підвищити точність дослідження її динамічних характеристик;

- вперше розроблено імітаційну модель багатомашинної енергосистеми на основі уніфікованих параметризованих моделей газотурбінних установок зі спільним частотним контуром та алгоритмами розподілу регулювальних впливів, що забезпечило можливість комплексного дослідження впливу режимів роботи агрегатів і стратегій керування на показники якості частотного регулювання, надійність енергосистеми та забезпечення надійного енергопостачання;

– вперше розроблено методи математичного та імітаційного моделювання і структурного синтезу автоматизованої системи керування первинним частотним регулюванням гібридної газотурбінної енергосистеми з акумуляторною системою зберігання енергії, які ґрунтуються на ієрархічному принципі розподілу функцій між швидкодіючим накопичувачем та газотурбінними установками і забезпечують підвищення динамічної та аварійної стійкості системи.

Наукові положення, висновки та результати дисертаційного дослідження пройшли належну апробацію та опубліковані у фахових наукових виданнях, що підтверджує їх достовірність і відповідність вимогам до дисертаційних досліджень. Основні результати відображено у таких публікаціях:

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. 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 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>; URL:

<https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/3254>

4. Olga Tarakhtiy; Vladyslav Zhukovskyi; Andrii Ivaneiev; Oleksandr Yavorskyi; 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>

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені у дисертаційній роботі Яворського Олександра Володимировича, є достатньо обґрунтованими, логічно взаємопов'язаними та підтверджуються результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень. Робота характеризується чіткою структурою, у якій простежується послідовний перехід від аналізу сучасного стану проблеми до розроблення математичних моделей, синтезу структур

автоматизованого керування, проведення імітаційних досліджень та формулювання практичних рекомендацій.

Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням сучасного математичного апарату теорії автоматичного керування, математичного й імітаційного моделювання, методів структурного синтезу систем керування, а також застосуванням програмного комплексу MATLAB Simulink для дослідження динамічних процесів у газотурбінних та гібридних енергосистемах. Побудовані математичні моделі відповідають сучасним уявленням про фізичні процеси, що відбуваються в газотурбінних установках та акумуляторних системах зберігання енергії, а результати чисельних експериментів узгоджуються із загальновідомими закономірностями функціонування електроенергетичних систем як у нормальних, так і в аварійних режимах.

Ступінь обґрунтованості результатів підтверджується також повним виконанням поставленої мети та всіх завдань дослідження. У дисертаційній роботі:

- виконано аналіз сучасних підходів до математичного моделювання газотурбінних установок і методів автоматизованого керування частотними режимами енергосистем, що дозволило визначити основні напрями їх подальшого вдосконалення;

- розроблено узагальнену математичну модель газотурбінної установки та отримано апроксимаційні залежності її параметрів від номінальної потужності, що забезпечує можливість дослідження динамічних процесів у широкому діапазоні режимів роботи;

- створено імітаційну модель багатомашинної гібридної енергосистеми, на якій досліджено вплив режимів роботи газотурбінних агрегатів і стратегій розподілу регулювальних впливів на показники якості частотного регулювання;

– розроблено математичні моделі та структури автоматизованого керування первинним частотним регулюванням із використанням акумуляторної системи зберігання енергії, виконано їх комплексне дослідження та обґрунтовано переваги ієрархічної структури керування щодо підвищення динамічної й аварійної стійкості енергосистеми.

Практична значущість одержаних результатів полягає у можливості застосування запропонованих моделей, алгоритмів та структур автоматизованого керування під час проєктування, модернізації та дослідження систем первинного частотного регулювання сучасних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними накопичувачами енергії. Крім того, результати роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Одеська політехніка» та використовуються при викладанні дисциплін, пов'язаних із моделюванням процесів, автоматизацією виробничих процесів і сучасними системами керування.

Також ступінь обґрунтованості наукових положень підтверджується відповідністю дисертаційної роботи вимогам освітньо-наукової програми третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тема, мета, поставлені завдання та отримані результати дослідження узгоджуються з метою зазначеної освітньо-наукової програми, яка передбачає підготовку докторів філософії, здатних здійснювати самостійні наукові дослідження, розробляти нові математичні моделі, методи та алгоритми автоматизованого керування складними технічними системами, а також виконувати науково-педагогічну діяльність у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

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 оцінювання якості функціонування автоматизованих систем керування;

СК3 – знання та глибоке розуміння предметної області, професійної та наукової діяльності;

СК4 – здатність виконувати оригінальні наукові дослідження та отримувати результати, що створюють нові знання у сфері автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій;

СК5 – здатність представляти та обговорювати результати наукових досліджень українською та англійською мовами;

СК6 – здатність застосовувати сучасні методи дослідження, математичного моделювання, синтезу та проектування систем автоматизації;

СК7 – здатність здійснювати науково-педагогічну діяльність та дотримуватися принципів академічної доброчесності;

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.

Зміст дисертаційної роботи безпосередньо підтверджує сформованість зазначених компетентностей, оскільки виконане дослідження охоплює розроблення математичних моделей газотурбінних установок і акумуляторних систем зберігання енергії, синтез структур автоматизованого керування частотою, проведення комплексного імітаційного моделювання, оцінювання показників якості та надійності функціонування гібридних енергосистем, а також розроблення нових методів автоматизованого керування, що мають наукову новизну та практичне значення.

Отримані результати підтверджують сформованість у здобувача програмних результатів навчання та професійних компетентностей, передбачених освітньо-науковою програмою, насамперед щодо проведення самостійних наукових досліджень, математичного моделювання, синтезу автоматизованих систем керування, застосування сучасного програмного забезпечення, оцінювання показників якості функціонування систем автоматизації та впровадження інноваційних технічних рішень у галузі автоматизації й комп'ютерно-інтегрованих технологій.

По дисертаційній роботі є наступні зауваження:

1. Практична цінність отриманих результатів не викликає сумнівів. Разом із тим робота виграла б від більш детального висвітлення можливостей практичного впровадження запропонованих моделей та алгоритмів керування на реальних об'єктах електроенергетики, зокрема з урахуванням сучасних вимог до систем накопичення енергії та особливостей їх інтеграції в енергосистему.

2. У роботі проведено порівняння запропонованих структур частотного регулювання між собою. Разом із тим для більш повного обґрунтування ефективності розроблених рішень доцільно було б доповнити дослідження порівнянням із окремими сучасними закордонними підходами до керування гібридними енергосистемами.

3. Доцільним було б більш детально дослідити чутливість запропонованої системи керування до зміни окремих параметрів газотурбінної установки та акумуляторної системи зберігання енергії, що дозволило б ширше оцінити область практичного застосування запропонованих рішень.

4. У роботі використовується термін «частотне регулювання» у значенні підтримання частоти електроенергетичної системи. Доцільно було б на початку роботи більш чітко визначити це поняття, оскільки в теорії автоматичного керування термін може трактуватися і в інших значеннях.

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

Рівень виконання поставленого наукового завдання

Дисертаційна робота Яворського О.В. виконана на високому науковому рівні та повною мірою відповідає поставленій меті й визначеним завданням дослідження. У процесі виконання роботи автором розв'язано актуальну науково-прикладну задачу автоматизації керування частотою гібридних енергосистем, до складу яких входять газотурбінні установки та акумуляторні системи зберігання енергії.

У дисертації розроблено математичні та імітаційні моделі газотурбінних установок, створено модель багатомашинної енергосистеми, досліджено різні стратегії розподілу регульовальних впливів між генеруючими агрегатами, а також запропоновано ієрархічну структуру автоматизованої системи первинного частотного регулювання із застосуванням акумуляторної системи зберігання енергії. Отримані результати забезпечують покращення якості перехідних процесів, підвищення динамічної та аварійної стійкості енергосистеми, а також більш ефективне використання генеруючих потужностей і накопичувачів енергії.

Повнота оприлюднення результатів дослідження

Основні результати дисертаційної роботи достатньою мірою висвітлено в опублікованих наукових працях автора. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, серед яких 7 статей у фахових наукових виданнях України (з них одна стаття індексується міжнародною наукометричною базою Scopus) та 4 тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях. Опубліковані праці повністю відображають зміст дисертації, її основні результати, положення наукової новизни та практичну цінність, а також відповідають вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії.

Дотримання принципів академічної доброчесності

Аналіз змісту дисертаційної роботи не виявив ознак порушення принципів академічної доброчесності. Представлені результати є узгодженими з опублікованими науковими працями автора, виконані з дотриманням вимог щодо коректного використання наукових джерел та належного оформлення результатів дослідження.

Відповідність дисертації принципам академічної доброчесності також підтверджується результатами перевірки за допомогою програмного комплексу StrikePlagiarism (протокол № 333638733 від 11.05.2026 р.). За результатами аналізу, проведеного фахівцями кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій та членами групи забезпечення освітньо-наукової програми зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», встановлено, що дисертаційна робота відповідає вимогам академічної доброчесності.

Практичне значення отриманих результатів

Результати дисертаційної роботи мають практичне значення для автоматизації процесів керування сучасними електроенергетичними системами. Розроблені математичні моделі, алгоритми та структури автоматизованого керування можуть бути використані під час проєктування, моделювання, дослідження та модернізації систем первинного частотного регулювання гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії.

Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню якості частотного регулювання, покращенню динамічної та аварійної стійкості енергосистем, а також більш ефективному використанню наявних генеруючих потужностей без необхідності суттєвої модернізації існуючого обладнання.

Практична цінність результатів підтверджується також їх впровадженням в освітній процес Національного університету «Одеська політехніка» під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки на кафедрі програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій. Матеріали дисертації використовуються при викладанні дисциплін «Автоматизація виробничих процесів», «Моделювання процесів і систем», «Сучасні системи керування» та «Оптимальні та адаптивні системи управління».

Зв'язок дисертаційного дослідження з науковими програмами

Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів наукових досліджень Національного університету «Одеська політехніка» та пов'язана з виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт, затверджених Міністерством освіти і науки України.

Результати дослідження є складовою виконання НДР «Моделі та методи термодеструкції органічної сировини довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини» (№ 253-47, державна реєстрація № 0124U004588) та «Розробка методів та моделей автоматизованого керування тепловою потужністю парових котлів при спалюванні сумішей вуглеводневих палив змінного складу» (№ 268-47, державна реєстрація № 0125U004012), що підтверджує актуальність і практичну спрямованість проведених досліджень.

Оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності

Матеріали дисертаційної роботи свідчать, що Яворський Олександр Володимирович у повному обсязі оволодів сучасною методологією наукових досліджень у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Під час виконання дослідження здобувач продемонстрував здатність самостійно формулювати наукову проблему, визначати напрями її розв'язання, обирати адекватні методи дослідження та критично оцінювати отримані результати.

Досягнення поставленої мети забезпечено завдяки комплексному застосуванню методів математичного моделювання, теорії автоматичного керування, системного аналізу, структурного синтезу автоматизованих систем, комп'ютерного імітаційного моделювання та чисельного експерименту.

Використання сучасного програмного середовища MATLAB Simulink дозволило провести всебічне дослідження динамічних процесів у гібридних енергосистемах із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії.

У процесі виконання дисертації автором проведено аналіз сучасного стану наукових досліджень за тематикою роботи, розроблено математичні й імітаційні моделі газотурбінних установок та багатомашинної енергосистеми, синтезовано структури автоматизованого керування, виконано комплекс імітаційних досліджень для різних режимів функціонування енергосистеми та здійснено оцінювання ефективності запропонованих технічних рішень за сукупністю показників якості перехідних процесів.

Результати дисертаційного дослідження підтверджують сформованість у здобувача навичок самостійного виконання комплексних наукових досліджень, здатність до розроблення нових математичних моделей, аналізу складних технічних систем, синтезу алгоритмів автоматизованого керування та обґрунтування отриманих наукових результатів. Це свідчить про належний рівень наукової підготовки здобувача та його готовність до подальшої самостійної наукової й науково-педагогічної діяльності.

Таким чином, рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності повністю відповідає вимогам, що висуваються до підготовки докторів філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а отримані результати підтверджують сформованість необхідних дослідницьких, аналітичних та професійних компетентностей.

Висновок

Дисертаційна робота Яворського Олександра Володимировича «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане з удосконаленням моделей, методів та структур автоматизованого керування частотними режимами

гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії.

Отримані автором наукові результати характеризуються науковою новизною, достатнім рівнем теоретичного обґрунтування та практичною цінністю. Запропоновані математичні й імітаційні моделі, структури автоматизованого керування та результати їх дослідження можуть бути використані під час розроблення й удосконалення сучасних систем автоматичного керування електроенергетичними об'єктами, а також у подальших наукових дослідженнях у сфері автоматизації енергетичних систем.

Дисертація відповідає 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), а її автор продемонстрував належний рівень професійної підготовки, здатність до самостійного проведення наукових досліджень та вирішення актуальних науково-технічних завдань.

З урахуванням актуальності теми, наукової новизни, практичного значення отриманих результатів та відповідності дисертаційної роботи встановленим вимогам вважаю, що Яворський Олександр Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Рецензент

доктор технічних наук, професор,
професор, професор кафедри
програмних і комп'ютерно-
інтегрованих технологій,

Національний університет «Одеська
політехніка»

Олександр БРУНЕТКІН