

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, доцента

Федоришина Романа Мироновича на дисертаційну роботу

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»

Актуальність обраної теми

Дисертаційна робота Яворського Олександра Володимировича присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі автоматизації керування частотними режимами сучасних електроенергетичних систем, у складі яких використовуються газотурбінні установки та акумуляторні системи зберігання енергії. Вибрана тема відповідає сучасним напрямкам розвитку електроенергетики, що характеризуються активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, накопичувачів енергії та цифрових технологій керування, які висувають підвищені вимоги до забезпечення стійкої та надійної роботи енергосистем.

Зростання частки низькоінерційних джерел генерації істотно ускладнює підтримання частоти в допустимих межах, особливо за умов значних збурень і швидкої зміни режимів навантаження. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розроблення моделей і методів автоматизованого керування, здатних забезпечити ефективну взаємодію традиційних генеруючих установок із сучасними акумуляторними накопичувачами енергії та підвищити динамічну й аварійну стійкість енергосистем.

Суттєвою перевагою дисертаційної роботи є комплексний характер проведених досліджень. Автором послідовно розглянуто всі основні етапи

створення системи автоматизованого керування: від розроблення узагальненої математичної моделі газотурбінної установки та її параметризації до побудови імітаційної моделі багатомашинної енергосистеми, дослідження різних стратегій розподілу регулювальних впливів і синтезу ієрархічної структури первинного частотного регулювання із застосуванням акумуляторної системи зберігання енергії. Такий підхід дозволяє врахувати взаємний вплив окремих елементів енергосистеми, їх динамічні характеристики та експлуатаційні обмеження, що підвищує достовірність результатів моделювання та наближує їх до реальних умов експлуатації.

Практична цінність виконаного дослідження полягає у можливості використання розроблених математичних моделей, алгоритмів і структур автоматизованого керування під час проєктування, аналізу та модернізації систем первинного частотного регулювання сучасних електроенергетичних систем. Запропоновані рішення забезпечують підвищення якості перехідних процесів, покращення частотної стійкості та більш ефективне використання можливостей газотурбінних установок і акумуляторних накопичувачів без необхідності істотного переоснащення діючого енергетичного обладнання.

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до тематики держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська політехніка»: «Моделі та методи термодеструкції органічної сировини довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини» (НДР № 253-47, державна реєстрація № 0124U004588) та «Розробка методів та моделей автоматизованого керування тепловою потужністю парових котлів при спалюванні сумішей вуглеводневих палив змінного складу» (НДР № 268-47, державна реєстрація № 0125U004012), що підтверджує зв'язок виконаної роботи з пріоритетними напрямками наукових досліджень Міністерства освіти і науки України.

Таким чином, дисертаційна робота є своєчасною, має вагоме теоретичне та практичне значення, відповідає сучасним тенденціям розвитку автоматизації електроенергетичних систем і спрямована на вирішення актуального науково-прикладного завдання щодо підвищення ефективності, надійності та стійкості функціонування гібридних енергосистем.

Новизна представлених теоретичних та експериментальних результатів дослідження

Дисертаційна робота Яворського Олександра Володимировича містить сукупність нових науково обґрунтованих теоретичних і практичних результатів, які спрямовані на розв'язання актуального науково-прикладного завдання автоматизованого керування частотними режимами гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії. Запропоновані автором рішення характеризуються внутрішньою логічною завершеністю, взаємозв'язком окремих етапів дослідження та достатнім рівнем наукової новизни.

До найбільш вагомих результатів, що визначають наукову цінність дисертації, належать:

- вперше розроблено метод динамічного моделювання газотурбінної установки, який комплексно враховує інерційні процеси ротора, теплові процеси в камері згоряння, акумулюючі властивості газових об'ємів та вплив допоміжних газів, що дозволило встановити апроксимаційні залежності параметрів перехідних процесів від номінальної потужності установки та забезпечити більш адекватне відтворення її динамічних властивостей;

- вперше створено імітаційну модель багатомашинної енергосистеми, основу якої становлять уніфіковані параметризовані моделі газотурбінних установок, об'єднані спільним контуром частотного регулювання та алгоритмами розподілу регулювальних впливів, що забезпечило можливість комплексного аналізу впливу режимів роботи агрегатів і стратегій керування на показники

якості частотного регулювання, надійність функціонування енергосистеми та забезпечення надійного електропостачання;

– вперше запропоновано методичний підхід до математичного та імітаційного моделювання і структурного синтезу автоматизованої системи первинного частотного регулювання гібридної енергосистеми, який ґрунтується на ієрархічній координації роботи акумуляторної системи зберігання енергії та газотурбінних установок, що забезпечує підвищення динамічної й аварійної стійкості енергосистеми та ефективніше використання регулювальних ресурсів.

Отримані наукові результати пройшли необхідну апробацію, достатньо повно висвітлені у фахових наукових виданнях та безпосередньо відповідають основним положенням, винесеним автором на захист. Це підтверджує їх достовірність, завершеність та відповідність вимогам, що висуваються до дисертаційних досліджень на здобуття ступеня доктора філософії.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у низці наукових праць автора, зокрема у фахових виданнях України та міжнародних наукових журналах, серед яких:

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 практичні рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі Яворського Олександра Володимировича, є належним

чином обґрунтованими, взаємоузгодженими та логічно впливають із поставленої мети й визначених завдань дослідження. Їх достовірність забезпечується використанням сучасного математичного апарату, методів системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного й імітаційного моделювання, а також результатами численних обчислювальних експериментів.

Методологія дослідження побудована послідовно та охоплює всі основні етапи розв'язання поставленої науково-прикладної задачі. Автором проведено ґрунтовний аналіз сучасних підходів до моделювання газотурбінних установок і систем частотного регулювання, розроблено узагальнену математичну модель газотурбінної установки, створено імітаційну модель багатомашинної гібридної енергосистеми та виконано дослідження різних структур і алгоритмів автоматизованого керування із використанням акумуляторних систем зберігання енергії.

Ефективність запропонованих моделей, методів і структур керування підтверджується результатами імітаційного моделювання, які демонструють покращення показників якості частотного регулювання, підвищення динамічної та аварійної стійкості енергосистеми, а також більш ефективне використання газотурбінних установок і накопичувачів енергії за різних режимів функціонування.

Практичні рекомендації, наведені в роботі, є логічним продовженням отриманих результатів дослідження та можуть бути використані під час розроблення, аналізу і модернізації систем автоматизованого керування частотою сучасних гібридних електроенергетичних систем, а також у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Отже, наукові положення, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертації, є достатньо аргументованими, базуються на сучасних наукових

методах дослідження та підтверджуються результатами проведених теоретичних і імітаційних експериментів.

Рівень виконання поставленого наукового завдання

Дисертаційна робота Яворського Олександра Володимировича характеризується:

– *високим рівнем виконання поставленого наукового завдання, яке полягає у створенні та науковому обґрунтуванні математичних моделей, методів і структур автоматизованого керування частотними режимами гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії. У процесі виконання дослідження автором послідовно реалізовано всі етапи наукової роботи: від аналізу сучасного стану проблеми та існуючих методів математичного опису й керування газотурбінними установками до розроблення математичних та імітаційних моделей багатомашинної енергосистеми, удосконалення алгоритмів розподілу регулювальних впливів, синтезу структур автоматизованого керування та підтвердження їх ефективності за результатами комп'ютерного моделювання;*

– *зв'язком проведеного дослідження з планами науково-дослідних робіт, що виконуються в Національному університеті «Одеська політехніка» відповідно до тематик, затверджених Міністерством освіти і науки України. Основні результати дисертації отримано під час виконання держбюджетних науково-дослідних робіт «Моделі та методи термодеструкції органічної сировини довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини» (НДР № 253-47, державна реєстрація № 0124U004588) та «Розробка методів та моделей автоматизованого керування тепловою потужністю парових котлів при спалюванні сумішей вуглеводневих палив змінного складу» (НДР № 268-47, державна реєстрація № 0125U004012), що підтверджує її відповідність актуальним напрямам розвитку наукових досліджень у галузі автоматизації;*

– *дотриманням принципів академічної доброчесності.* Дисертаційна робота виконана відповідно до вимог академічної етики, що підтверджується опублікуванням основних результатів у рецензованих фахових наукових виданнях, у тому числі у виданні, яке індексується міжнародною наукометричною базою Scopus, а також результатами перевірки в системі StrikePlagiarism (протокол № 333638733 від 11.05.2026 р.). За результатами експертизи, проведеної фахівцями кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій та членами групи забезпечення освітньо-наукової програми зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам академічної доброчесності;

– *повнотою оприлюднення результатів дослідження.* Основні положення, висновки та результати дисертаційної роботи відображено у 11 наукових публікаціях, серед яких 7 статей у фахових наукових виданнях України (з них 1 стаття опублікована у виданні, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus) та 4 тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях. Опубліковані праці достатньо повно висвітлюють наукову новизну, основні результати та практичне значення дисертаційного дослідження. Під час апробації та оприлюднення результатів дотримано вимог 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 12.01.2022 року (зі змінами);

– *значущістю отриманих результатів для практичного використання.* Практична цінність дисертації полягає у можливості застосування запропонованих математичних моделей, алгоритмів та структур автоматизованого керування під час проєктування, аналізу та вдосконалення систем первинного частотного регулювання гібридних енергосистем із

газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії. Запропоновані технічні рішення забезпечують покращення показників якості частотного регулювання, підвищення динамічної й аварійної стійкості енергосистем та ефективніше використання генерувальних потужностей без необхідності суттєвої модернізації існуючого обладнання. Практичне значення роботи підтверджується також впровадженням її результатів 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 при викладанні дисциплін «Автоматизація виробничих процесів», «Моделювання процесів і систем», «Сучасні системи керування» та «Оптимальні та адаптивні системи управління».

Оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності

Дисертаційна робота засвідчує, що Яворський Олександр Володимирович успішно оволодів методологією проведення сучасних наукових досліджень, передбаченою освітньо-науковою програмою підготовки доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

У ході виконання дисертаційного дослідження здобувач продемонстрував уміння самостійно визначати актуальну науково-прикладну проблему, формувати мету та завдання дослідження, обирати адекватні методи їх розв'язання, здійснювати аналіз отриманих результатів і формулювати науково обґрунтовані висновки.

Методологічною основою роботи стали сучасні підходи математичного й імітаційного моделювання, методи теорії автоматичного керування, системного аналізу, структурного синтезу, модельно-орієнтованого проєктування та комп'ютерного експерименту. Їх комплексне застосування забезпечило можливість дослідити динамічні процеси в гібридних газотурбінних енергосистемах, виконати оцінювання ефективності запропонованих алгоритмів

і структур керування та обґрунтувати рекомендації щодо їх практичного використання.

Результати дисертаційної роботи свідчать про сформованість у здобувача високого рівня науково-дослідницьких, аналітичних та інженерних компетентностей, необхідних для виконання самостійних наукових досліджень і професійної діяльності у сфері автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. За змістом, рівнем виконання та застосованими методами дослідження робота повністю відповідає вимогам, що висувуються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У першому розділі бажано було б більш детально висвітлити особливості використання газотурбінних установок у сучасних високоманеврених енергосистемах з великою часткою відновлюваних джерел енергії.

2. Автором запропоновано математичну модель газотурбінної установки, однак доцільно було б доповнити дослідження оцінкою похибки моделювання відносно експериментальних або паспортних характеристик обладнання.

3. При дослідженні різних стратегій керування було б корисно провести оцінку їхньої ефективності за додатковими інтегральними критеріями якості регулювання.

4. Роботу можна було б посилити дослідженням впливу запропонованих алгоритмів керування на довготривалий ресурс акумуляторної батареї та економічну ефективність експлуатації гібридної енергосистеми.

Наведені зауваження не знижують високий науковий рівень роботи та її наукову і практичну цінність.

Оцінка дисертації у цілому

Вважаю, що дисертаційна робота Яворського Олександра Володимировича на тему «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами», а також наукові праці, у яких оприлюднено її основні результати, виконані на високому науковому та методичному рівні.

Дисертація є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане з удосконаленням математичних моделей, методів і структур автоматизованого керування частотними режимами гібридних енергосистем із газотурбінними установками та акумуляторними системами зберігання енергії. Запропоновані автором рішення спрямовані на підвищення ефективності первинного частотного регулювання, забезпечення більш високої динамічної та аварійної стійкості енергосистем, а також раціональніше використання генерувальних потужностей і накопичувачів енергії.

Дисертаційна робота повністю відповідає освітньо-науковій програмі «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». У процесі дослідження автором комплексно використано сучасні методи математичного та імітаційного моделювання, теорії автоматичного керування, системного аналізу і модельно-орієнтованого проектування, що дозволило отримати нові науково обґрунтовані результати, які мають істотне теоретичне та практичне значення для розвитку автоматизації сучасних електроенергетичних систем.

Науковий рівень дисертаційної роботи та опублікованих за її результатами наукових праць відповідає вимогам пунктів 7–9 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). Представлені у роботі наукові результати є новими, достатньо обґрунтованими та в сукупності забезпечують розв'язання актуального науково-прикладного завдання у сфері автоматизованого керування електроенергетичними системами.

З урахуванням актуальності обраної теми, наукової новизни, належного рівня обґрунтованості отриманих результатів, їх практичного значення 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».

Офіційний опонент

доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих
технологій, Національний університет
«Львівська політехніка»

Роман ФЕДОРИШИН