

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора

Осадчого Сергія Івановича 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 теми** «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами» обумовлена сучасними тенденціями розвитку електроенергетики, які характеризуються зростанням частки розподіленої генерації, широким впровадженням систем накопичення енергії, зменшенням інерційності енергосистем та підвищенням вимог до забезпечення якості електричної енергії. За таких умов особливого значення набувають питання забезпечення якості стабілізації частоти як у нормальних, так і в аварійних режимах функціонування енергосистеми.

Дисертація Яворського О.В. спрямована на розв'язання складного науково-прикладного завдання підвищення стійкості та якості функціонування сучасних гібридних джерел електроенергії, побудованих на базі газотурбінних установок та акумуляторного обладнання за рахунок автоматизації процесів керування частотою у номінальних та аварійних режимах. З огляду на це, вважаю, що тема дисертації є актуальною, відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки та техніки, оскільки є складовою частиною держбюджетних науково-дослідних робіт Національного університету «Одеська політехніка» за темами «Моделі та методи термодеструкції органічної сировини довільного складу за рахунок автоматичного керування подачі сировини» (№ державної реєстрації 0124U004588) та «Розробка методів та моделей автоматизованого керування тепловою потужністю парових котлів при спалюванні сумішей вуглеводневих палив змінного складу» (№ державної реєстрації 0125U004012).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Дослідження виконані з дотриманням класичного підходу до вивчення проблеми, відповідно до обраної тематики та поставлених дослідницьких завдань. Структурно дослідження складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Слід відзначити, що автор логічно та послідовно виклав основні результати дослідження, супроводжуючи їх аналітичним обґрунтуванням і висновками, що забезпечує цілісне розкриття всіх визначених завдань. Проведений критичний аналіз вітчизняних і зарубіжних наукових джерел повністю підтверджує наукову обґрунтованість положень дисертації.

Завдяки комплексному та критичному аналізу отриманих результатів, а також коректному використанню сукупності наукових методів і прийомів, здобувач зміг чітко й аргументовано сформулювати основні положення у висновках. Висновки мають логічний характер і безпосередньо впливають із результатів власних досліджень дисертанта, достовірність яких підтверджується наведеними у роботі таблицями та графічними матеріалами.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у постановці та розв'язанні нових завдань щодо удосконалення математичних моделей газотурбінних установок, розроблення імітаційної моделі багатомашинного джерела електроенергії, дослідження стратегій розподілу регулювальних впливів між газотурбінними агрегатами та створення ієрархічної структури автоматизованого керування із використанням акумуляторних систем зберігання енергії.

До висвітлених у дисертації нових наукових результатів відношу наступне:

- вперше розроблено імітаційну модель динаміки зміни частоти багатомашинної системи генерації, що складається з моделей чотирьох газотурбінних установок, та має спільний контур регулювання. Отримана модель дозволяє досліджувати вплив режимів роботи агрегатів і стратегій керування на якість частотного регулювання при нульових початкових умовах;
- поширена дія методу поліноміальної апроксимації результатів моделювання динаміки складного технічного об'єкта на випадок отримання нових залежностей параметрів перехідних процесів газотурбінної установки від її номінальної потужності при нульових початкових умовах;
- поширена дія методів математичного та імітаційного моделювання для виконання структурного синтезу автоматизованої системи первинного регулювання частоти гібридної газотурбінної енергосистеми з акумуляторною системою зберігання енергії.

**Практичне значення.** Запропоновані в дисертації моделі та методи мають практичне значення для проектування, дослідження та модернізації автоматичної стабілізації частоти систем генерації з газотурбінними установками та акумуляторними засобами зберігання енергії в умовах дії ступінчастих збурень.

Обґрунтовані рішення сприяють підвищенню якості стабілізації частоти та забезпеченню стійкості системи стабілізації в умовах дії трьох типів аварійних ситуацій без необхідності суттєвого технічного переоснащення існуючих об'єктів.

Розроблена імітаційна модель дозволяє впровадити сучасні методи моделювання у процес проектування електроенергетичної системи з комбінованими джерелами енергії різного принципу функціонування. Єдина вимога для їх застосування - це наявність відповідних диференціальних рівнянь окремих елементів. Моделі газотурбінної установки та системи акумулювання знайдені Яновським О.В.

Практичні результати дисертації впроваджено в освітній процес Національного університету «Одеська політехніка» при підготовці здобувачів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки на кафедрі програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій під час викладання дисциплін «Автоматизація виробничих процесів», «Моделювання процесів і систем», «Сучасні системи керування» та «Оптимальні та адаптивні системи управління».

**Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.** Аналіз дисертації та публікацій Яновського О.В. свідчить про відсутність порушень академічної доброчесності. Дисертант дотримується принципів академічної доброчесності, належного цитування джерел, достовірного подання отриманих наукових результатів та відповідального ставлення до оприлюднення результатів власного дослідження.

У дисертації наведено посилання на використані літературні джерела. Запозичення супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями, що дає змогу відокремити власні наукові результати здобувача від результатів, отриманих іншими авторами. У роботі не встановлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації результатів, некоректного використання праць інших авторів або неправомірного привласнення наукових результатів. Наведені у дисертації моделі, методи, структурні схеми, результати моделювання та висновки узгоджуються з поставленою метою і завданнями дослідження та мають характер самостійно отриманих наукових результатів

Таким чином, дисертація Яновського Олександра Володимировича відповідає вимогам академічної доброчесності, а підстав для сумнівів щодо самостійності виконаного дослідження та коректності використання джерел не встановлено.

**Оприлюднення результатів дисертаційної роботи** здійснено у 11 наукових працях, серед яких 7 статей у фахових наукових виданнях України (у тому числі 1 стаття, що індексується міжнародною наукометричною базою Scopus) та 4 тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях. Зазначені публікації повною мірою відображають всі складові роботи та свідчать про достатній рівень апробації результатів.

Публікацій за темою дисертації мають достатній часовий інтервал. В них в повному обсязі відображені наукові положення дисертації. При оприлюдненні наукових результатів було дотримано вимоги «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», згідно Постанови КМУ №44 від 12.01.2022, із змінами.

**Оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.** Автор дисертації Яновський Олександр Володимирович оволодів методологією наукової діяльності, що відповідає ОНП 3-го рівня спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування». Це підтверджується отриманими

результатами виконаного дослідження і спрямованістю роботи на здобуття ступеня доктора філософії.

Використана методологія наукового пізнання для досягнення мети дисертаційного дослідження узгоджується з цілями освітньо-наукової програми 3-го рівня спеціальності 151 та забезпечує формування науково-педагогічних компетентностей здобувача, необхідних для самостійного проведення дослідження, підготовки та захисту дисертації. Вона також забезпечує оволодіння методологією наукової та викладацької роботи у закладах вищої освіти й наукових установах шляхом розвитку системного мислення, творчого потенціалу та здатності розв'язувати комплексні проблеми в галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Отримані у дисертації наукові результати відповідають програмним, предметним, фаховим та інноваційним компетентностям освітньо-наукової програми 3-го рівня спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», що узгоджується із заявленим у дисертації завданням підвищення ефективності та надійності енергосистеми, а також стійкості системи стабілізації частоти в гібридних джерелах електроенергії з газотурбінними установками та акумуляторними накопичувачами.

**Недоліки та зауваження до дисертації.** Водночас з позитивною оцінкою роботи вважаю доцільним виділити окремі дискусійні питання, зауваження та побажання:

1. Аналіз змісту дисертації вказує на наявність невдалих словосполучень або неологізмів. Наприклад, на сторінці 32 автор використовує такі словосполучення: детальні термогазодинамічні моделі, моделі з зосередженими параметрами (стор. 32) та інші. У відповідності з загальноновизнаною термінологією виникає питання, які моделі мав на увазі автор? Напевне, це математичні моделі динаміки газотурбінних установок, як об'єктів керування з розподіленими та зосередженими параметрами. Адже не існує моделей з зосередженими параметрами, є певні фізичні об'єкти з зосередженими або розподіленими параметрами. У газотурбінній установці відбуваються реальні фізичні явища: стиснення повітря, згоряння палива, розширення газів, теплообмін. Саме ці процеси мають термогазодинамічну природу. Натомість моделювання (як процес пізнання) не може бути «термогазодинамічним» — воно буває математичним, числовим, комп'ютерним, імітаційним або фізичним.

2. На сторінці 37 стверджується, що «Альтернативним підходом є використання рівномірного або частково рівномірного розподілу збурення між генеруючими джерелами, незалежно від їх поточного завантаження.» Яким чином фізично можна здійснити розподіл збурення та для якої топології ЕЕС це можна застосувати? Накладаються хоча б якісь вимоги на місце виникнення, характер зміни та можливість вимірювання збурення?

3. Було б не погано навести у тексті дисертації рівняння (1), яке після перетворень стає рівнянням (2.2). Оскільки ротор турбіни здійснює обертальний рух, то рівняння (2.2) визначає динаміку його руху в реальних умовах функціонування, а не тільки у перехідному процесі. В усталеному

режимі можуть відбуватися коливання моментів рушійних сил та моментів сил опору.

4. На сторінці 63 наведено Simulink модель газотурбінної установки (рис. 2.4-рис. 27), що розроблена автором, як він зазначає, на основі рівнянь (2.6), (2.22), (2.38). Ця модель викликає цілий ряд питань. По-перше, де та яким чином врахована динаміка регулятора 5 зі схеми на рис. 2.1? По-друге, звідки з'явилася аперіодична ланка у моделі динаміки ротора (рис. 2.6), адже позиційна складова у лівій частині рівняння (2.6) відсутня? По-третє, які міркування покладені в основу заміни часткових похідних за часом від змінних  $\Delta g$  та  $\Delta p$  у лівих частинах рівнянь (2.22) та (2.38) звичайними похідними за часом в моделях (рис. 2.5) та (рис. 2.7)? Останнє, чому автор не вказує на те, що визначена ним модель працює лише при нульових початкових умовах?

5. На сторінці 91 автор говорить про те, що на рис. 3.8 зображені часові реалізації частоти. У тексті дисертації на рис. 3.8 представлена Simulink модель.

6. Підрозділ 4.3 має назву «Аналіз аварійної частотної стійкості та надійності гібридної газотурбінної системи». По-перше в теорії автоматичного керування немає поняття частотна стійкість. По-друге, якщо автор намагався дослідити стійкість системи стабілізації частоти при виникненні певних аварійних ситуацій, то доцільним виглядало б використання відповідних критеріїв стійкості динамічних систем. Фактично, у цьому підпункті аналізується якість роботи системи за виглядом перехідної характеристики зміни частоти. Ймовірність безвідмовної роботи системи взагалі не визначається, тому казати про аналіз надійності на мій погляд недоцільно.

7. Не зрозуміло, чому третій абзац на сторінці 115 представляє результати аналізу змісту другого розділу дисертації, очікувалось би отримати оцінку четвертого розділу.

Наведені зауваження дещо зменшують загальне позитивне враження від дисертації, але не перекреслюють достовірність, коректність та значимість представлених у ній результатів.

#### **Оцінка дисертації у цілому**

Вважаю, що дисертація Яворського Олександра Володимировича «Моделі автоматизованого керування частотними режимами газотурбінних енергосистем з акумуляторами» та наукові публікації, у яких висвітлено її основні результати, виконані на високому науковому рівні.

Дисертаційна робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане з розробленням і вдосконаленням математичних моделей, методів та структур автоматизованого керування частотними режимами гібридних енергосистем, до складу яких входять газотурбінні установки та акумуляторні системи зберігання енергії. Запропоновані автором рішення спрямовані на підвищення якості стабілізації частоти, покращення стійкості енергосистем та

забезпечення більш раціонального використання генеруючих потужностей та накопичувачів енергії.

Дисертація відповідає освітньо-науковій програмі «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». У роботі комплексно використано сучасні методи математичного й імітаційного моделювання, теорії автоматичного керування, модельно-орієнтованого проєктування та дослідження динамічних процесів в електроенергетичних системах, що дозволило отримати нові науково обґрунтовані результати, які мають як теоретичне, так і практичне значення.

Науковий рівень дисертації та опублікованих за її тематикою праць відповідає критеріям, визначеним пунктами 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). У роботі наведено нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуального науково-прикладного завдання у сфері автоматизації керування сучасними електроенергетичними системами.

З огляду на актуальність теми дослідження, належний рівень наукової новизни, обґрунтованість отриманих результатів, їх практичне значення та відповідність дисертації 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 рецензент  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри електротехнічних  
систем та енергетичного менеджменту  
Центральноукраїнського національного  
технічного університету

Сергій ОСАДЧИЙ