

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації Марколенко Тетяни Дмитрівни
на тему «Модель і метод регулювання теплової потужності котла при зміні
теплотворної здатності вуглеводного палива для підвищення ефективності»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології,
в галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування**

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Сучасна енергетика перебуває під впливом численних викликів, серед яких ключовими є зростання вартості традиційних енергоресурсів, погіршення якості палив та посилення вимог до екологічної безпеки. Особливу загрозу становить нестабільність теплотворної здатності вуглеводного палива, що зумовлена змінами в його складі, походженні або технології попередньої підготовки (наприклад, біогаз, доменний газ, природний газ із домішками). Ці зміни безпосередньо впливають на процеси горіння, ефективність вироблення теплової енергії та рівень шкідливих викидів.

Існуючі системи автоматизованого керування паровими котлами часто не враховують змін теплотворної здатності палива, що призводить до нестабільного горіння, перевитрати повітря та палива, зростання об'ємів димових газів, а також до підвищення викидів оксидів азоту (NO_x) і чадного газу (CO). Як наслідок, знижується загальна енергоефективність установок і порушуються вимоги міжнародних стандартів, зокрема положення Паризької кліматичної угоди щодо обмеження шкідливих викидів.

Крім того, сучасні тенденції розвитку енергетики орієнтовані на впровадження адаптивних технологій, здатних ефективно працювати в умовах змінного теплового навантаження та нестабільного складу палива. Враховуючи, що значна частина теплоенергетичних об'єктів вже функціонує або проектується для роботи з паливами різної якості, стає нагальним завданням пошук нових технічних

рішень у сфері автоматизованого керування котельними установками. Це дозволить зменшити втрати теплової потужності, підвищити паливну економічність та забезпечити екологічну стійкість роботи енергетичних систем.

У цьому контексті особливої актуальності набуває задача розробки математичної моделі та методу регулювання теплової потужності котла з урахуванням змін теплотворної здатності палива. Такий підхід дозволить підвищити енергоефективність функціонування теплотехнічного обладнання, забезпечити стабільність процесу горіння та зменшити вплив на довкілля.

2. Мета дисертаційного дослідження

Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності роботи парового котла та дотримання екологічних показників якості процесу спалювання шляхом вдосконалення математичної моделі об'єкта керування тепловою потужністю в динамічних режимах функціонування, розроблення методу керування об'ємом димових газів з урахуванням змін теплотворної здатності паливної суміші, а також розробки нового способу автоматизованого регулювання теплової потужності і перевірки ефективності запропонованих рішень на основі обчислювального моделювання для забезпечення стабільної потужності та підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) котла з мінімальним негативним впливом на довкілля.

Для досягнення мети дослідження, необхідно:

- провести аналіз сучасного стану автоматизованих систем керування котлами зі змінним складом вуглеводневого палива з урахуванням їх класифікації, технологічних властивостей та обґрунтувати необхідність вдосконалення САК;
- розробити модель об'єкта керування тепловою потужністю котла при зміні теплотворної здатності вуглеводного палива, що забезпечує стабільність витрати димових газів та достовірне відтворення процесу згоряння;
- розробити метод керування об'ємом та температурою димових газів при змінному навантаженні парового котла, з урахуванням співвідношення компонентів паливної суміші, що дозволяє підтримувати сталий температурний режим і високий ККД;

– розробити спосіб автоматизованого регулювання теплової потужності котла за теплотворною здатністю вуглеводневого палива, який враховує критерії ефективності, показники якості горіння та вплив на довкілля, із забезпеченням сталої витрати димових газів у широкому діапазоні навантажень.

Об'єкт дослідження – процес керування тепловою потужністю парового котла в умовах змінного теплового навантаження та змінної теплотворної здатності вуглеводного палива.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи та алгоритми автоматизованого керування тепловою потужністю котла на основі регулювання об'єму димових газів з урахуванням поточного складу паливної суміші.

3. Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, науковими напрямами Університету та кафедри

Робота виконана відповідно до положень чинного законодавства України у сфері енергоефективності, теплопостачання та раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів. Зокрема, дослідження ґрунтується на положеннях Закону України «Про енергетичну ефективність» від 21 жовтня 2021 р. № 1818-IX, Закону України «Про теплопостачання» від 2 червня 2005 р. № 2633-IV, а також Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України» від 30 червня 2023 р. № 3220-IX.

Розробка моделі та методу регулювання теплової потужності котла здійснювалася з урахуванням стратегічних напрямів державної політики, визначених в Енергетичній стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (розпорядження КМУ від 18 серпня 2017 р. № 605-р), Національному плані дій з енергоефективності на період до 2030 року, а також Концепції реалізації державної політики у сфері теплопостачання на період до 2035 року (розпорядження КМУ від 8 грудня 2021 р. № 1618-р). Окрему увагу приділено дотриманню вимог ДСТУ ISO 50001:2019 «Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо використання»,

що сприяє впровадженню системного підходу до підвищення енергоефективності теплотехнічного обладнання в умовах змінних параметрів палива.

Відповідає планам, затверджених Міністерством освіти і науки України, які виконано в Національному університеті «Одеська політехніка» і є складовою частиною держбюджетних НДР за темами: «Підвищення ефективності комп'ютерно-інтегрованих систем управління (КІСУ) за рахунок моделювання нелінійних високоенергетичних динамічних процесів», НДР № 235-47 (№0123U102484), «Розробка моделі та методу математичного забезпечення автоматизованих систем керування, які використовують паливо змінного складу для зменшення енергоємності виробництва», НДР № 206-47 (№ 0122U000566).

4. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Наукові результати, викладені у дисертації, отримані автором самостійно. Автору належать основні ідеї, пов'язані з удосконаленням моделі об'єкту керування теплової потужності котла та розрахунку складу та об'єму димових газів при спалюванні вуглеводного палива змінного складу, а також розробкою нового методу керування об'ємом димових газів та способу автоматизованого регулювання теплової потужності котла при змінній теплотворній здатності вуглеводневого палива для підвищення енергоефективності та екологічності котлоагрегатів.

5. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Факт відсутності порушення академічної доброчесності підтверджується:

– протоколом програми StrikePlagiarism [ID: 331254769] від 18.05.2025 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;

– достатньою кількістю публікацій здобувача за темою роботи в авторитетних рецензованих виданнях, в яких здійснюється обов’язкова перевірка поданих робіт на відсутність запозичень.

6. Ступінь новизни основних результатів дисертаційної роботи порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

– удосконалено математичну модель процесу спалювання несертифікованого газоподібного палива шляхом урахування нелінійної зміни кількості тепла, що підводиться до топкового пристрою, та змін умов теплообміну, пов’язаних зі значними коливаннями у потоці димових газів, що дало змогу забезпечити стабілізацію їх витрати в умовах змінної теплоти згоряння паливної суміші;

– знайшло подальшого розвитку метод і імітаційна модель розрахунку складу та об’єму димових газів при спалюванні вуглеводного палива змінного складу, що дозволяє за заданими характеристиками паливної суміші визначати параметри продуктів згоряння або зворотно – формувати склад суміші відповідно до теплового навантаження, забезпечуючи основу для адаптивного керування тепловою потужністю котла;

– вперше запропоновано метод керування об’ємом димових газів при змінному навантаженні котла, що базується на використанні параметра, який характеризує кількість димових газів на одиницю теплотворної здатності палива, і дає змогу підтримувати сталість димогазового потоку, стабілізувати температуру продуктів згоряння, уникати режиму конденсації на малих навантаженнях та підвищити ККД котла на максимальних, із одночасним зменшенням питомих викидів CO_2 за рахунок оптимального складу паливної суміші;

– вперше розроблено спосіб автоматизованого регулювання теплової потужності котла шляхом адаптивного формування паливної суміші з прогнозованою теплотворною здатністю відповідно до поточного теплового навантаження, із використанням непрямих вимірювань витрати димових газів за перепадом тиску на поверхні теплообміну та їх температурою, що дозволило забезпечити постійну номінальну витрату димових газів на всьому діапазоні

потужності та покращило енергоефективність у всьому робочому діапазоні навантажень.

7. Наукове та практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Відому модель котла доповнено залежностями, що враховують вплив змін теплотворної здатності на нелінійні властивості процесу теплообміну в конвективних поверхнях нагріву котла. Це дозволило створити адекватну модель для широкого діапазону зміни паливної суміші та навантаження котла в межах від 100 до 40 %.

Розроблена структура автоматизованої системи керування забезпечує сталу витрату димових газів при збуреннях, спричинених зміною як складу палива, так і теплового навантаження. Реалізація методу регулювання теплової потужності шляхом варіювання складу паливної суміші дозволяє зберегти об'ємну витрату палива сталою, уникнувши модернізації існуючого обладнання.

Такий підхід має низку важливих переваг. По-перше, він дає змогу здійснювати гнучке регулювання потужності без реконструкції чи заміни існуючого обладнання, що суттєво знижує фінансові та технологічні витрати на адаптацію системи до змінних режимів споживання енергії. По-друге, аналіз динаміки зміни складу паливної суміші засвідчив, що частка метану в суміші зменшується швидше, ніж загальна теплова потужність установки. Це означає, що при зниженні навантаження одночасно знижується вміст вуглецевих компонентів у суміші, що беруть участь у процесі горіння.

Зменшення частки метану, як основного джерела вуглецевих сполук у паливі, призводить до відповідного зниження вмісту вуглекислого газу (CO_2) у продуктах згоряння. Це відкриває можливості для підвищення екологічної ефективності та зменшення парникових викидів без втрати експлуатаційної надійності. Таким чином, результати дослідження демонструють перспективність розробленого методу як з позиції енергоефективності, так і з точки зору екологічної безпеки.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національного університету «Одеська політехніка» при підготовці бакалаврів та

магістрів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» в Інституті штучного інтелекту та робототехніки (ІШІР) на кафедрі «Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій» при викладанні наступних дисциплін: Моделювання процесів і систем; Автоматизація виробничих процесів; Оптимальні та адаптивні системи управління; Сучасні системи керування.

8. Повнота опублікування результатів дисертаційного дослідження та особистий внесок здобувачки до всіх наукових публікацій, опублікованих у співавторстві та зарахованих за темою дисертації

Результати наукових досліджень опубліковані в 20 друкованих працях, з них 6 – у спеціалізованих наукових виданнях (1 публікація – у міжнародній науково метричній базі SCOPUS, 1 публікація – у наукових фахових виданнях України, категорії «А»), 13 – доповідей та тез доповідей на міжнародних, всеукраїнських та науково-технічних конференціях, 1 патент України на винахід.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Beglov, K., Kozlov, O., Kondratenko, Y., **Markolenko, T.**, & Krivda, V. (2023). Automatic control of the boiler heat power based on changing hydrocarbon fuel's calorific value. Problems of Control and Informatics, 68(2), 75–92. DOI: <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2023-2-6> (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «А»)

2. Kryvda, V., Brunetkin, O., Beglov, K., **Markolenko, T.**, & Lutsenko, I. (2024). Method of controlling the volume of combustion products at different boiler loads. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (1), 100–104. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/100> (SCOPUS)

3. **Markolenko T.**, Prodanov D. (2024). Model of greenhouse gas emission minimization under variable load of a steam boiler. Інформатика та математичні методи в моделюванні. 2024; Том 14, № 14: 284 – 295. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v14.no4.284>

4. **Марколенко, Т. Д., Проданов, Д. Г., Беглов, Я. І.** (2025). Управління тепловим навантаженням котла при спалюванні твердих побутових відходів. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 42(118), 43–51. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.42.118.2025.5>

5. **Бакшанська, Т. Д.*, Рижиков, Ю. Г., & Тодорцев, Ю. К.** (2007). Математична модель процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання для цілей управління. Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы, (2), 44–51. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2007_2_9

6. **Бакшанська, Т. Д.*, Рижиков, Ю. Г., & Тодорцев, Ю. К.** (2008). Мінімізація токсичності продуктів згорання та втрат теплоти у топкових пристроях з рециркуляцією продуктів згорання на основі узагальненого критерію оптимізації. Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы, (1), 143–149. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aaeks_2008_1_24

7. Спосіб регулювання теплової потужності котла за теплотворною здатністю газу під час роботи котла на потужності, відмінній від номінальної: пат. України № 127803; заявл. 17.01.2022; опубл. 03.01.2024. Бюл. №1.

* (У поданих публікаціях авторка опублікована під прізвищем **Бакшанська Т.Д.**, яке згодом було змінено на **Марколенко Т.Д.**).

9. **Апробація результатів дисертаційної роботи**

Результати проведеного дисертаційного дослідження були представлені, обговорені і отримали схвалення на таких конференціях: I Міжнародна науково-практична конференція «Science and Information Technologies in the Modern World» Афіни, Греція, 2025 р.; II Міжнародна науково-практична конференція «Modern Science, Economy and Digital Innovation» Бухарест, Румунія, 2025 р.; VIII Міжнародна науково-практична конференція «Current trends in scientific research development» Бостон, США, 2025 р.; VIII Міжнародна науково-практична конференція «Scientific research: modern challenges and future prospects» Мюнхен, Німеччина, 2025 р.; I Міжнародна науково-практична конференція «The Future of Science, Technology and Economy» Софія, Болгарія, 2025 р.; 69 – 72 науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та

студентів (ОНАЗ ім. О. С. Попова, Одеса, 2014–2017 рр.); I та III Всеукраїнські науково-практичні конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (Київ, 2013, 2014 рр.).

10. Відповідність дисертаційної роботи вимогам, що передбачено пунктами 6 і 7 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії»

Виконана робота відповідає пунктам 6 - 7 Постанови КМ України № 44 від 12.01.2022 р. «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» зі змінами внесеними згідно з Постановою КМ України № 341 від 21.03.2022 р., Постановою КМ України № 502 від 19.05.2023 р., Постановою КМ України № 507 від 03.05.2024, та чинним вимогам МОН України.

В цілому, дисертаційна робота є *завершеною науковою працею*, що відповідає вимогам спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

За актуальністю, науковою новизною, теоретичним, методичним та практичним значенням, обґрунтованістю одержаних результатів та оформленням, дисертаційна робота Марколенко Тетяни Дмитрівни відповідає чинним вимогам Міністерства освіти і науки України, зокрема, п. п. 6 і 7 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», та може бути рекомендована до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Головуючий на засіданні
д.т.н., проф., завідувач кафедри
програмних і комп'ютерно-
інтегрованих технологій

Максим МАКСИМОВ