

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента **ФЕДОРИШИНА Романа Мировича**

на дисертацію **СЛОВІКОВСЬКОГО Олексія Миколайовича**

на тему: **«Інтелектуальна система керування сушильним агрегатом**

при виробництві цементних сумішей»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Актуальність обраної теми дослідження. На сучасному етапі розвитку промислового виробництва одним із ключових напрямів підвищення конкурентоспроможності підприємств є впровадження інтелектуальних систем автоматизації, здатних забезпечувати енергоефективне, надійне та адаптивне керування технологічними процесами. Особливої актуальності ці завдання набувають у галузях, де виробничі процеси характеризуються значним енергоспоживанням та складною взаємодією теплових, газодинамічних та електромеханічних процесів. Одним із таких процесів є сушіння сировини при виробництві цементних сумішей. Саме процес сушіння значною мірою визначає якість кінцевої продукції, стабільність технологічного циклу та рівень витрат паливно-енергетичних ресурсів. У сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв і посилення екологічних вимог до промислових підприємств питання підвищення ефективності роботи сушильних агрегатів набуває особливої важливості. Водночас традиційні системи керування сушильними агрегатами часто не забезпечують необхідної адаптивності до зміни властивостей сировини, коливань температурних режимів, витрати палива та інших зовнішніх впливів. Це призводить до перевитрат енергетичних ресурсів, погіршення якості сушіння та зниження ефективності виробництва. У зв'язку з цим все більшого поширення набувають підходи, засновані на використанні цифрових технологій, математичного та багатофізичного моделювання, а також інтелектуальних алгоритмів оптимізації й керування. Слід відзначити активний розвиток концепцій цифрових двійників та Industry 4.0, які передбачають створення інтегрованих моделей технологічних об'єктів для прогнозування їх поведінки та оптимізації режимів роботи в реальному часі. Використання таких підходів у системах керування сушильними агрегатами відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності виробництва, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення стабільної якості продукції. Дисертація присвячена розробленню інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей на основі математичного, багатофізичного моделювання та адаптивних алгоритмів керування, є актуальним науковим дослідженням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку автоматизації промислових технологічних процесів та потребам виробництва.

Слід зауважити, що дисертація виконана здобувачем в рамках науково-дослідних робіт «Розвиток теорії та моделювання нестационарних електрофізичних процесів в електропровідних і діелектричних середовищах імпульсних електромагнітних систем» (номер державної реєстрації 0123U100671) та «Розробка електротехнології підготовки та спалювання паливних сумішей з утилізованою водою та рідинними відходами різного походження» (номер державної реєстрації 0226U002768), в яких автор був виконавцем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Дисертаційне дослідження О. М. Словіковського включає в себе анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, списки використаних джерел (усього 141 позиція) та шість додатків.

Аналіз дисертації О. М. Словіковського свідчить про те, що автору вдалося успішно досягти поставленої мети дослідження та вирішити сформульовані наукові й практичні завдання. Представлені у роботі наукові положення, висновки та рекомендації є достатньо обґрунтованими, логічно взаємопов'язаними та базуються на результатах комплексних теоретичних і прикладних досліджень.

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується використанням сучасних методів математичного, багатофізичного та імітаційного моделювання, а також застосуванням сучасних програмних комплексів Ansys Fluent, Ansys Maxwell, Ansys Twin Builder і засобів автоматизації Schneider Electric. У роботі послідовно розглянуто питання аналізу предметної області, розроблення математичних моделей, створення алгоритмів керування та їх практичної реалізації у складі автоматизованої системи керування сушильним агрегатом.

Особливістю дисертації є комплексне поєднання моделей газодинамічних, теплових та електромеханічних процесів із засобами промислової автоматизації та алгоритмами інтелектуальної оптимізації. Отримані результати є логічним наслідком проведених досліджень, а сформульовані висновки повною мірою відповідають поставленим у роботі завданням та змісту виконаних досліджень.

Дисертація вирізняється повнотою проведених досліджень: від аналізу сучасного стану проблеми до побудови працездатної інженерної моделі. Представлені технічні рішення та математичні підходи логічно пов'язані з метою дослідження та адекватно відображають поставлені завдання. Усе це свідчить про достатній рівень наукової зрілості автора та обґрунтованість сформульованих у роботі положень і рекомендацій.

Об'єктом дослідження є процес сушіння сировини у сушильному агрегаті при виробництві цементних сумішей, зокрема режими теплообміну, масообміну, регулювання швидкості обертання барабана, температури та вологості матеріалу.

У першому розділі виконано аналіз сучасних конструкцій газових пальників, систем автоматизації процесів горіння та сушіння, а також засобів керування технологічними

процесами в сушильних агрегатах. Розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності та автоматизації теплотехнічного обладнання. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано напрям дослідження та сформульовано основні завдання дисертації.

У другому розділі виконано теоретичне обґрунтування режимів роботи сушильного агрегату та газового пальника. Розроблено математичні моделі газодинамічних процесів, процесів теплообміну та горіння, що дозволило сформувати основу для подальшого моделювання та дослідження системи керування.

У третьому розділі розроблено комплекс імітаційних моделей сушильного агрегату із використанням програмних середовищ Ansys Fluent, Ansys Maxwell та Ansys Twin Builder. Проведено багатофізичне моделювання газодинамічних, теплових та електромеханічних процесів, реалізовано моделі електроприводів і створено інтегровану модель системи керування. Окрему увагу приділено застосуванню генетичного алгоритму для оптимізації режимів роботи сушильного агрегату.

У четвертому розділі реалізовано практичну частину дослідження, пов'язану зі створенням системи автоматизованого керування на базі обладнання Schneider Electric. Розроблено програмне забезпечення контролера, операторський інтерфейс та алгоритми керування технологічним процесом. Наведено результати дослідження роботи системи в різних режимах функціонування, які підтверджують ефективність запропонованих технічних та алгоритмічних рішень.

Структура дисертації є послідовною та логічно завершеною. Кожний наступний розділ базується на результатах попереднього, а отримані результати в сукупності забезпечують досягнення поставленої мети дослідження.

Достовірність та наукова новизна одержаних результатів. Винесені на захист положення дисертації представляють собою науково обґрунтовані, достовірні результати і положення, які у сукупності сприятимуть подальшому розвитку теорії та практики створення інтелектуальних систем керування сушильними агрегатами та автоматизованих систем керування технологічними процесами. Достовірність одержаних результатів забезпечується використанням сучасних методів математичного, багатофізичного та імітаційного моделювання, застосуванням апробованих програмних комплексів Ansys Fluent, Ansys Maxwell і Ansys Twin Builder, а також використанням сучасних засобів промислової автоматизації Schneider Electric. Обґрунтованість запропонованих технічних рішень підтверджується узгодженістю результатів моделювання та експериментальних досліджень, виконаних на створеному програмно-технічному комплексі. Отримані результати свідчать про адекватність розроблених моделей та ефективність запропонованих алгоритмів

керування сушильним агрегатом, що підтверджує достовірність сформульованих у дисертації висновків.

Автор дисертації:

1) запропонував застосування комплексного підходу до математичного моделювання та оптимізації системи газового пальника, що включає:

- інтелектуальну систему оптимізації режимів роботи сушильного агрегату на основі генетичного алгоритму, яка, на відміну від існуючих підходів параметричного регулювання, забезпечує адаптивний багатокритеріальний вибір раціональних технологічних параметрів з урахуванням поточного стану сировини, енергетичних показників та конструктивних обмежень обладнання, що дозволяє підвищити енергоефективність процесу сушіння та стабільність технологічного режиму.

- математичну модель системи керування газовим пальником сушильного агрегату з урахуванням динаміки приводів вентиляторів і шиберів повітрязбірника, що забезпечує адаптивне регулювання параметрів горіння та процесу сушіння;

2) удосконалив методи автоматичного регулювання режимів роботи сушильного агрегату шляхом застосування векторного та скалярного керування електроприводами, а також PID-регулювання виконавчих механізмів, що дозволило підвищити точність стабілізації технологічних параметрів та знизити енергоспоживання системи. Запропоновані методи дозволяють зменшити енергоспоживання приводів на 10–15 % та забезпечити точність регулювання швидкості вентиляторів із похибкою не більше 2 %, а позиціювання шиберів – з похибкою до 1°;

3) надав подальшого розвитку підходу до моделювання та оптимізації режимів роботи сушильних агрегатів на основі інтеграції математичних моделей, систем автоматизації та засобів імітаційного моделювання для аналізу роботи технологічного обладнання в умовах змінного навантаження та нестационарних режимів роботи. Розширено використання симуляційного моделювання для аналізу роботи приводів і систем управління в умовах змінного навантаження та аварійних ситуацій. Зокрема, створено інтегровану модель газового пальника, де дані Ansys Fluent про температуру та тиск передаються в Ansys Twin Builder для моделювання реакції системи управління, що дозволяє досліджувати динамічну поведінку системи в реальних умовах експлуатації.

Виходячи зі змісту виконаного дослідження, здобувачем розроблено комплексний підхід до побудови інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей, який поєднує математичне, багатофізичне та імітаційне моделювання з сучасними засобами промислової автоматизації. У роботі успішно реалізовано всі поставлені завдання дослідження: розроблено математичні та імітаційні моделі основних процесів сушіння, створено алгоритми адаптивного керування та оптимізації режимів роботи

сушильного агрегату, а також виконано їх практичну реалізацію на базі обладнання Schneider Electric. Отримані результати є науково обґрунтованими, достовірними та характеризуються науковою новизною.

Практичне значення і впровадження одержаних результатів дослідження. Зміст одержаних у дисертації результатів доповнює науково-практичні підходи до побудови інтелектуальних систем керування технологічними процесами сушіння в промисловості. Розроблені математичні моделі, алгоритми адаптивного керування, засоби багатофізичного моделювання та оптимізації режимів роботи можуть бути використані під час проєктування, модернізації та впровадження автоматизованих систем керування сушильними агрегатами різного призначення. Практичну цінність становлять розроблені моделі та програмно-технічні рішення, реалізовані із застосуванням сучасних засобів автоматизації Schneider Electric, що можуть бути використані для підвищення енергоефективності технологічних процесів, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення стабільної якості готової продукції. Окремі результати дослідження впроваджено в навчальний процес підготовки магістрів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Національного університету біоресурсів і природокористування України. Отримані результати можуть бути використані у подальших наукових дослідженнях у галузі автоматизації технологічних процесів, під час створення цифрових двійників промислового обладнання, а також при розробленні сучасних інтелектуальних систем керування об'єктами промислової теплоенергетики.

Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів дисертації в опублікованих працях. Дисертація є самостійною науковою роботою, результати й досягнення котрої було отримано автором самостійно. Усі сформульовані в ній положення та висновки обґрунтовано на основі власних авторських досліджень з посиланнями на актуальні й сучасні наукові джерела. Результати дисертації відповідним чином висвітлено у 15 наукових працях, з яких стаття у науковому виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 8 статей у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 4 тези наукових доповідей, 2 авторські свідоцтва на твір. Якість та кількість наукових публікацій здобувача за темою дисертації вказує на сумлінність виконання ним публікаційних завдань з оприлюднення наукових результатів, висновків і рекомендацій, отриманих під час виконання наукової роботи.

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Дисертація на тему: «Інтелектуальна система керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей» відповідає спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та вимогам 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 від 12 січня 2022 року № 44.

Змістове наповнення розділів дисертації узгоджується з темою кожного з розділів, що робить зміст дисертації відповідним темі роботи. Висновки, сформульовані автором на основі проведеного дослідження, є чіткими, доведеними та підтвердженими. Оформлення дисертації відповідає встановленим нормативними документами вимогам.

Анотація до дисертації повною мірою відповідає її змісту, структурі та основним результатам. Вона стисло, проте інформативно передає суть дослідження, його актуальність, наукову новизну, мету, завдання та практичну значущість. Текст анотації відповідає вимогам академічного стилю, логічний, граматично і стилістично коректний.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації. Загалом позитивно оцінюючи дисертацію О. М. Словіковського, вбачається за доцільне звернути увагу на окремі положення та висновки дисертації, що потребують уточнення або додаткової аргументації, та можуть слугувати підґрунтям наукової дискусії, зокрема:

1. У дисертації значна увага приділена моделюванню газодинамічних, теплових та електромеханічних процесів, однак недостатньо розкрито питання впливу фізичних властивостей різних типів сировини на параметри процесу сушіння. З огляду на те, що вологість, гранулометричний склад та теплофізичні характеристики матеріалу можуть суттєво відрізнятися, доцільним було б більш детально розглянути можливість адаптації системи керування до різних видів сировини.

2. У роботі використано сучасні програмні комплекси для багатофізичного моделювання, проте недостатньо висвітлено питання обчислювальних витрат та ресурсомісткості створених моделей. Наведення відповідної інформації дозволило б більш повно оцінити можливості використання запропонованих підходів у реальних промислових умовах.

3. У роботі розглянуто функціонування системи керування в номінальних режимах роботи сушильного агрегату, однак питання поведінки системи при різких змінах навантаження або параметрів технологічного процесу висвітлено обмежено. Більш детальне дослідження перехідних режимів дозволило б розширити практичну значущість отриманих результатів.

4. При описі структури інтелектуальної системи керування основну увагу приділено технічній реалізації та алгоритмам керування. Водночас доцільно було б більш детально розглянути питання інтеграції запропонованої системи з верхнім рівнем автоматизації підприємства, зокрема SCADA- та MES-системами.

5. У роботі наведено результати досліджень для конкретної конфігурації сушильного агрегату та обладнання Schneider Electric. Для підвищення універсальності отриманих

результатів доцільно було б надати рекомендації щодо адаптації запропонованих технічних рішень до обладнання інших виробників або до сушильних установок іншого типу.

6. Дисертація в цілому викладена на належному науковому та методичному рівні, проте в тексті трапляються окремі редакційні, стилістичні та термінологічні неточності. Подекуди спостерігається не зовсім однорідне використання окремих технічних термінів і скорочень.

Висловлені зауваження та рекомендації характеризують складність дослідженої проблеми та суттєво не впливають на її загальну позитивну оцінку та науково-практичну значущість.

Загальний висновок та оцінка дисертації. Вищенаведене свідчить про високий рівень наукової компетентності О. М. Словіковського у досліджуваній проблематиці. Дисертація виконана відповідно до встановлених вимог до подібних наукових праць, засвідчує наявність у здобувача дослідницьких та аналітичних здібностей і містить аргументований авторський доробок за темою дослідження.

Дисертація є самостійним, завершеним, оригінальним науковим дослідженням, виконаним на актуальну тему, що містить нові науково обґрунтовані результати проведених досліджень, які розв'язують конкретне наукове завдання, а саме: розроблення інтелектуальної системи керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей.

Дисертація О. М. Словіковського на тему: «Інтелектуальна система керування сушильним агрегатом при виробництві цементних сумішей» за змістом, обсягом, актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значущістю здобутих результатів відповідає спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) і 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 (з наступними змінами).

З огляду на вищезазначене здобувач Словіковський Олексій Миколайович заслуговує на присудження освітньо-наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Офіційний опонент доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка», доктор технічних наук, доцент Роман ФЕДОРИШИН