

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Місюри Тимофія Олексійовича

на тему «Енергоефективність комбінованих схем опалення, вентиляції та кондиціонування на основі повітряних теплових насосів»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 – електрична інженерія

за спеціальністю 144 – теплоенергетика

Актуальність теми дисертації.

На сьогодні пошуки альтернативних джерел енергії є одним з провідних напрямів досліджень у теплоенергетиці та енергозбереженні. В енергетиці з'являються нові стратегії з підвищення енергоефективності та вдосконалюються існуючі системи тепlopостачання, вентиляції та кондиціонування. Пропонуються шляхи економії вичерпних енергоресурсів та зниження навантаження на традиційні теплогенеруючі установки із застосуванням теплових насосів у вентиляції, кондиціонуванні та тепlopостачанні. Але сам по собі тепловий насос не завжди може бути виправданим рішенням, попри його ефективність. Якщо тепlopостачання здійснюється лише за допомогою теплового насоса (без додаткових заходів з підвищення ефективності), це найчастіше призводить до значних капітальних затрат та високого терміну окупності.

Актуальність і новизна даної теми полягає в реалізації енергоефективного проектування систем HVAC з додатковим включенням у теплонасосні схеми джерела низькопотенційної енергії. Такий підхід дозволяє зменшити витрати зовнішньої енергії на тепловий насос, знизити необхідну номінальну потужність агрегату, а також реалізує кінцеву мету сучасної енергетичної стратегії: утилізацію «безкоштовної» відновлювальної енергії в корисних цілях.

Метою даної роботи є способи підвищення енергоефективності повітряних теплонасосних систем вентиляції, кондиціонування та тепlopостачання.

Проведені дослідження відповідають Законам України «Про енергозбереження», «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки».

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- проведені дослідження із забезпечення вологісного режиму всередині приміщень теплонасосними системи. На практиці температура є основним параметром для припливного повітря, а додаткове осушення або зволоження відбуваються за допомогою інших пристроїв. У той час як теплові насоси за правильної організації потоків повітря можуть забезпечувати параметри припливного повітря не тільки за температурою, але і за відотною вологістю;
- проведений термодинамічний аналіз ефективності теплонасосної системи повітряного опалення та вентиляції виробничого приміщення з урахуванням видалення зайвої вологи. Встановлено, що коефіцієнт рециркуляції для підтримання заданих параметрів повітря в приміщенні має змінюватись в залежності як від температури, так і відотної вологості атмосферного повітря.
- проведено аналіз енергоефективності теплонасосних систем з різними способами утилізації низькопотенційної енергії витяжного повітря для вентиляції та кондиціювання приміщень. Розглянуто випадки роботи систем за умов, коли потребив кондиціюванні зросли вдвічі, коли в приміщенні присутні надлишкові вологовиділення.

Достовірність проведених досліджень забезпечується їх науково-методичною основою, а саме використанням таких методів дослідження: аналізу та синтезу, математичного та імітаційного моделювання, математичної статистики, термодинамічного моделювання, фундаментальні положення теорії тепломасообміну. Обробка результатів теоретичних досліджень проводилась з використанням пакетів прикладних програм Mathcad, Microsoft Excel, SolidWorks.

Високий ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, зроблених у дисертаційній роботі, обумовлений верифікацією методик проведення досліджень і порівнянням результатів тестових досліджень з літературними джерелами.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі теплової та альтернативної енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського у відповідності до ініціативної НДР «Розробка та дослідження ресурсозберігаючих технологій та процесів у промисловій теплоенергетиці», державний реєстраційний номер 0111U004644; пов'язані з науковими дослідженнями кафедри теплової та альтернативної енергетики за темою: «Екотехнології та технології енергозбереження» під керівництвом професора кафедри теплової та альтернативної енергетики, доктора технічних наук, Безродного Михайла Костянтиновича.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання – розробити алгоритм оцінки енергоефективності теплонасосних установок для

проектування як вентиляційних систем, так і припливно-витяжних установок – на базі аналізу сучасних схем HVAC, дослідження способів зміни температурного потенціалу зовнішнього повітря на вході до випарника теплового насоса для підвищення ефективності, розробки математичних моделей теплонасосних систем, їх чисельного аналізу за відповідних вхідних параметрів методом послідовних наближень, порівняльного аналізу досліджених схем HVAC на прикладі реальних об'єктів, виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Місюри Тимофія Олексійовича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 144 Теплоенергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Теплоенергетика».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Місюри Тимофія Олексійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

На підставі вище зазначеного можна зробити висновок, що автор дотримується принципів академічної доброчесності

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Матеріал дисертації викладений послідовно, з чіткою логічною структурою, завдяки чому є доступним для розуміння. Автор послуговується грамотною технічною мовою з використанням наукової термінології. Текст дисертації має достатній обсяг та проілюстрований рисунками.

Рукопис має належну редакторську якість та відповідає встановленим вимогам до оформлення та подання робіт наукового характеру.

Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, 7 розділів, висновків та списку використаних джерел із 105 найменувань. Загальний обсяг дисертації 168 сторінок, 62 рисунки.

У **вступі** дисертації висвітлено актуальність теми дослідження на сьогоднішній день та зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету, наукове завдання, об'єкт, предмет та методи

дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, представлено дані про апробацію дисертації та наявні публікації з окресленням особистого внеску здобувача.

В **першому розділі** дисертації проведено огляд та аналіз сучасних даних щодо ефективного застосування систем HVAC (опалення, вентиляція та кондиціювання повітря) на базі повітряних теплових насосів з додатковим використанням різних низькопотенційних джерел теплоти або холоду. Проаналізовано сучасні підходи та актуальні тенденції до збільшення енергоефективності теплонасосних систем, наведено літературний огляд з питань організації цих заходів. На основі проведеного огляду встановлено перелік питань, які потребують більш глибокого дослідження.

В **другому розділі** розглянуто принципову теплонасосну систему вентиляції та повітряного опалення виробничого приміщення з надлишковим вологовиділенням, у якій застосовано часткову рециркуляцію відпрацьованого повітря для підтримання заданих комфортних умов всередині приміщення. Показано, що необхідний для опалення додатковий підігрів припливного повітря може бути визначений через простий коефіцієнт пропорційності до перепаду температур всередині і ззовні приміщення, значення якого визначається характеристиками приміщення і кратністю повітрообміну. Проведено термодинамічний аналіз роботи системи для визначення необхідних режимів її роботи в холодний період року. Показано, що для підтримання заданих температури та вологовмісту повітря в приміщенні за різних параметрів довкілля коефіцієнт рециркуляції має змінюватись в залежності від температури і відносної вологості атмосферного повітря. Показані граничні межі застосування системи, після яких для підтримання комфортних умов в приміщенні необхідна робота системи в режимі кондиціювання припливного повітря. Отримані розрахункові величини питомих затрат зовнішньої енергії в даній системі, які характеризують енергетичну ефективність її роботи в залежності від параметрів навколишнього середовища.

В **третьому розділі** досліджуються можливості застосування системи вентиляції та кондиціювання з тепловим насосом для підтримки комфортних умов усередині виробничої зони в теплу пору року. У зв'язку з цим було проведено термодинамічний аналіз теплонасосної системи з частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря та змінною часткою свіжого зовнішнього повітря. Потім було проведено чисельний аналіз для оцінки впливу змін температури та відносної вологості навколишнього середовища та характеристик об'єкта вентиляції та кондиціювання на параметри системи. Це дозволило визначити потенційні можливості цієї системи підтримувати

комфортні умови у виробничій зоні. Також було показано, що необхідне додаткове охолодження припливного повітря на вході в приміщення для потреб кондиціонування повітря можна визначити за допомогою простого коефіцієнта, і у розділі наведено методику його розрахунку. Теплонасосна система має найбільшу енергоефективність у зоні низьких температур навколишнього середовища та багатом чому залежить від відносної вологості зовнішнього повітря. Це свідчить, що досліджена система підходить до застосування у країнах із помірно-континентальним кліматом.

В **четвертому розділі** проведено термодинамічний аналіз теоретичної моделі теплонасосної установки вентиляції та кондиціонування повітря з рециркуляцією холоду в залежності від параметрів зовнішнього повітря для підтримання температурних і вологісних умов у виробничому приміщенні в теплий період року. За допомогою чисельного аналізу методом послідовних наближень визначено параметри повітря в вузлових точках схеми та оцінено її енергетичну ефективність. Це дозволило встановити режими роботи установки в залежності від параметрів зовнішнього повітря, характеристик об'єктів вентиляції та кондиціонування та надходжень теплоти. Була кількісно відображена вагомість рециркуляції холоду для забезпечення високої ефективності роботи схеми. Досліджена система може бути придатною для застосування в країнах з помірним континентальним і вологим тропічним кліматом в усьому діапазоні температур навколишнього середовища, коли об'єктом вентиляції виступає виробниче приміщення з невисокою кратністю повітрообміну.

В **п'ятому розділі** досліджено ефективність та режими роботи моделі теплонасосної системи вентиляції та кондиціонування повітря з рекуперацією холоду вентиляційного повітря в залежності від параметрів зовнішнього повітря, ефективності рекуперації та характеристик приміщення. За прототип був взятий цех з виробництва кондитерських виробів, де в теплу пору року необхідно підтримувати технологічний (температурно-вологісний) режим. Проведено розрахунки методом послідовних наближень для оцінки параметрів повітря у вузлових точках системи. Це дозволило визначити теоретичну холодильну ефективність системи та довело переваги рекуперації в порівнянні з рециркуляцією для зменшення споживання енергії тепловим насосом. Досліджена система має найвищу енергоефективність в області відносно низьких температур і відносної вологості, що підходить для країн з помірно-континентальним кліматом.

В **шостому розділі** викладено результати термодинамічного аналізу моделі теплонасосної системи вентиляції, кондиціонування та осушення виробничого приміщення за змінних величин внутрішніх надходжень вологи

та теплоти у період перехідної та теплої пори роки. Встановлено та оцінено вплив рекуперації енергії відпрацьованого повітря на ефективність системи. В якості прототипу було прийнято ковальський цех, де необхідно підтримувати технологічні умови (температуру і відносну вологість). Принцип даної схеми полягає в тому, що виконуються умови постійних параметрів припливного повітря як по температурі, так і по вологості, у той час як в реальній практиці тільки один із параметрів є цільовим (найчастіше температура). Дана умова виконується спеціальною організацією повітряних потоків таким чином, щоб досягалась максимально ефективна утилізація енергії, яка була згенерована в системі. Встановлено теоретичну холодильну ефективність даної системи та показало переваги рекуперації енергії для зниження енергозатрат на роботу системи. Дану модель можна застосувати для проектування припливно-витяжних установок із встановленим контуром теплового насоса.

В сьомому розділі міститься порівняльний термодинамічний аналіз двох найбільш популярних рішень загальної вентиляції та кондиціювання повітря: припливно-витяжних установок (ПВУ), що базуються на вбудованих контурах теплових насосів (ТН) або зовнішніх компресорно-конденсаторних блоках (ККБ) як основних джерел енергії. Теоретичний аналіз проводився за однакових постійних умов у холодному режимі роботи в теплу пору року, коли необхідно охолоджувати припливне повітря. В результаті досліджень були побудовані графіки залежностей параметрів двох систем (температури та вологості повітря у вузлових точках систем, енергоефективності ТН або ККБ та схем в цілому) від параметрів зовнішнього повітря та потреб у вентиляції та кондиціюванні повітря всередині приміщення за умовами проекту. Досліджені теоретичні моделі двох систем можна використовувати для оцінки доцільності тієї чи іншої схеми в залежності від проекту, а також під час проектування ПВУ. Використовуючи даний аналіз, можна точно та ефективно підібрати такі реальні компоненти установки, як теплообмінники, компресор, терморегулюючий вентиль тощо для виробництва припливно-витяжних установок.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 21 науковій публікації здобувача, серед яких: 5 статей – у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 3 статті – у фахових наукових виданнях іноземних держав, 2 з яких – у наукових виданнях,

проіндексованих у базах даних Scopus, 13 тез доповідей у збірниках матеріалів конференції, з яких одна у виданні іноземних держав.

Також результати дисертації були апробовані на 13 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача мають високий науковий рівень, проходили рецензування та перевірку на плагіат згідно з умовами видавництва, що підтверджує дотримання принципу академічної доброчесності. Особистий внесок здобувача у всіх роботах, опублікованих у співавторстві, є вагомим, що підтверджується особистою участю у проведенні виконаних робіт. Публікації охоплюють усі результати дисертаційного дослідження.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені в наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Тема дисертації є досить узагальненою, тобто передбачає використання різних джерел енергії для утилізації корисної теплоти в контурі теплового насоса. У самій же роботі розглядаються в основному вентиляційні викиди з приміщення, як єдине джерело низькопотенційної енергії для теплового насоса. Також у кожній задачі в дисертації розглядається вплив надлишкових вологовиділень на роботу теплонасосних систем та досліджується їх ефективність та методи підвищення ефективності за даних умов. Враховуючи вище зазначене, вважаю, що тему дисертації можна було б сформулювати більш конкретно у відповідності до проведених досліджень.

2. В дослідженні розглядаються різні математичні моделі припливно-втяжних установок з контуром теплового насоса. Принципова різниця даних систем полягає в організації повітряних потоків, використанні додаткових енергоефективних пристроїв, таких як рекуператор або камера змішування. Проте схеми залишаються принциповими. І, навіть за високої ефективності досліджених систем, реалізація деяких з них може виявитись недоцільною з практичної точки зору в порівнянні з існуючими рішеннями. Додаткове вивчення цього питання та спроба показати, як би ці математичні моделі виглядали в реальності була б корисною. Адже в умовах сучасного виробництва подібні рішення мають бути не лише енергоефективними, але і компактними, ергономічними та найменш матеріаловитратними.

3. Некоректними є твердження, що містяться в роботі: «джерелом холоду виступають або зовнішній компресорно-конденсаторний блок (ККБ), або внутрішній контур теплового насоса (ТН)»; «джерелом холоду виступає ККБ» тощо. Згадані автором роботи машини та пристрої лише використовуються для реалізації процесів, які відбуваються в циклі.

4. В досліджених теплонасосних системах приймається, що температура всередині приміщення дорівнює $18\div 19^{\circ}\text{C}$. Чи не вважає автор дані значення температури занадто низьким для комфортного перебування в приміщенні людей?

5. Для оцінки всієї системи вентиляції та кондиціонування за певний період також має враховуватись сезонна ефективність теплового насоса. Цей показник, відомий як сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP), використовується виробниками теплонасосного обладнання в сучасній практиці та дозволяє визначити енергетичне маркування згідно з екодизайном. Наявність цих результатів в роботі була б корисною для оцінки практичної цінності дослідження.

6. На рис. 2.5 наводиться залежність коефіцієнта змінної часткової рециркуляції від параметрів навколишнього середовища, з якої видно, наприклад, що за $\phi_0 = 60\%$ критичною температурою для роботи дослідженої теплонасосної системи опалення є $t_0 = 12^{\circ}\text{C}$. При цьому автор зазначає, що за таких умов система має перейти «в режим кондиціонування, у якому забезпечується охолодження і осушення припливного повітря». Проте, якщо припливне зовнішнє повітря за температури $t_0 = 12^{\circ}\text{C}$ охолоджувати задля його осушення, то його температура стане ще нижчою, і таке повітря буде необхідно додатково підігрівати перед подачею в приміщення. Вважаю, що дане питання потрібно було б доопрацювати та висвітлити більш чітко.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Місюри Тимофія Олексійовича на тему «Енергоефективність комбінованих схем опалення, вентиляції та кондиціонування на основі повітряних теплових насосів» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Місюра Тимофій Олексійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 144 Теплоенергетика

Рецензентка:

доцентка кафедри теплової та
альтернативної енергетики
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
канд. техн. наук, доцентка



Ірина ФУРТАТ

« 15 » січня 2024 року

Підпис Ірини ФУРТАТ засвідчую

Сергій Загуба
директор МН



Світлана Шевель