

Л. А. ПРОЦ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-8162-2108

Ю. І. ФОРДЗЮН

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-6709-9525

Є. М. ЛЮТИЙ

доктор технічних наук,
професор кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-8349-5560

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МАШИНОБУДІВНИХ СИСТЕМ

У статті проаналізовано сучасні підходи до проєктування машинобудівних систем із врахуванням теплотехнічних процесів. Це зумовлено необхідністю підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу. Актуальність дослідження пояснюється зростанням вартості енергоресурсів, посиленням екологічних стандартів та необхідністю вдосконалення промислових систем для забезпечення їхньої відповідності вимогам сталого розвитку. Установлено, що традиційні підходи до проєктування машинобудівних систем не враховують динамічних умов експлуатації, що спричиняє значні теплові втрати та знижує ефективність роботи обладнання.

Метою дослідження є визначення основних факторів, які впливають на енергетичну ефективність машинобудівних систем, та розробка рекомендацій щодо впровадження інтегрованих теплотехнічних рішень для зниження енергетичних втрат і підвищення продуктивності. У ході дослідження використовувались методи аналізу сучасних підходів до проєктування машинобудівних систем, визначення важливих факторів впливу на енергоефективність, а також експериментальні дослідження із застосуванням типового теплообмінника. Оцінено вплив теплоізоляції трубопроводів і автоматизації насосного обладнання. Теоретичне узагальнення отриманих результатів сприяло формулюванню практичних рекомендацій.

Результати дослідження підтверджують, що застосування теплоізоляції трубопроводів зменшує теплові втрати до 20 %. Водночас упровадження автоматизованих систем управління насосами дає змогу знизити енергоспоживання на 10–15 %. Виявлено, що найвагоміший вплив на енергоефективність мають теплообмінні характеристики матеріалів, геометрія теплообмінників і режими роботи насосного обладнання. Розроблено рекомендації щодо модернізації систем, які включають використання сучасних ізоляційних матеріалів, удосконалення конструкцій теплообмінників та впровадження автоматизації технологічних процесів.

У висновках обґрунтовано доцільність упровадження інтегрованих теплотехнічних рішень для підвищення енергоефективності машинобудівних систем. Перспективами подальших досліджень визначено розробку адаптивних моделей для аналізу теплових процесів у реальному часі, створення нових матеріалів із покращеними теплоізоляційними властивостями та вдосконалення автоматизації управління технологічними процесами. Зазначені напрями сприятимуть підвищенню ефективності машинобудівних систем та забезпеченню їхньої відповідності вимогам сталого розвитку.

Ключові слова: теплотехнічні процеси, енергоефективність, теплоізоляція, автоматизація, теплообмінники, машинобудівні системи, зменшення теплових втрат.

L. A. PROTS

PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Engineering,
Technologies and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-8162-2108

YU. I. FORDZJYN

PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Engineering,
Technologies and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-6709-9525

YE. M. LYUTYI

Doctor of Engineering,
Professor at the Department of Engineering,
Technologies and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-8349-5560

INTEGRATION OF THERMAL ENGINEERING PROCESSES INTO THE DESIGN OF ENERGY-EFFICIENT MECHANICAL ENGINEERING SYSTEMS

The article analyses modern approaches to the design of mechanical engineering systems about thermal engineering processes. This is due to the need to improve energy efficiency and reduce environmental impact. The rising cost of energy resources explains the study's relevance, the tightening of environmental standards, and the need to improve industrial systems to ensure their compliance with the requirements of sustainable development. It has been established that traditional approaches to designing mechanical engineering systems do not consider dynamic operating conditions, which causes significant heat losses and reduces equipment efficiency.

The study aims to identify the main factors that affect the energy efficiency of mechanical engineering systems and develop recommendations for implementing integrated thermal engineering solutions to reduce energy losses and increase productivity. The study used methods of analysing modern approaches to the design of mechanical engineering systems, identifying important factors affecting energy efficiency, and experimental studies using a typical heat exchanger. The impact of pipeline insulation and automation of pumping equipment was assessed. The theoretical generalisation of the results obtained contributed to formulating practical recommendations.

The study results confirm that pipeline insulation reduces heat losses by up to 20 %. At the same time, the introduction of automated pump control systems can reduce energy consumption by 10–15 %. It was found that heat exchange characteristics of materials, geometry of heat exchangers and operating modes of pumping equipment have the most significant impact on energy efficiency. Recommendations for the modernisation of systems have been developed, including the use of modern insulation materials, improvement of heat exchanger designs and introduction of process automation.

The conclusions substantiate the feasibility of implementing integrated thermal engineering solutions to improve the energy efficiency of machine-building systems. Prospects for further research include the development of adaptive models for analysing thermal processes in real time, the creation of new materials with improved thermal insulation properties, and the improvement of process control automation. These areas will help increase the efficiency of engineering systems and ensure their compliance with the requirements of sustainable development.

Key words: heat engineering processes, energy efficiency, thermal insulation, automation, heat exchangers, machine-building systems, reduction of heat losses.

Постановка проблеми

Проектування енергоефективних машинобудівних систем належить до основних напрямів сучасної інженерної науки, пов'язаних із потребою підвищення ефективності використання енергоресурсів, зменшення викидів парникових газів та інтеграцією екологічно чистих технологій у промисловість. Особливу увагу в цьому контексті приділено теплотехнічним процесам, які відіграють важливу роль у забезпеченні оптимального енергетичного балансу систем і мінімізації енергетичних втрат. Традиційні підходи до аналізу теплотехнічних процесів часто не враховують комплексного впливу таких факторів, як теплообмін, термодинамічні характеристики матеріалів і режими роботи систем, що знижує ефективність наявних рішень.

Інтеграція теплотехнічних процесів у проектування машинобудівних систем вимагає міждисциплінарного підходу, який поєднує знання у сфері механіки, енергетики, матеріалознавства та автоматизації. Такий підхід передбачає застосування сучасних методів моделювання, що дають змогу враховувати складні теплові, механічні та динамічні процеси, а також упровадження енергоефективних технологій на різних етапах проектування. Це сприяє створенню систем, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності та можуть адаптуватися до змінних умов експлуатації, що є особливо важливим в умовах глобальних кліматичних змін.

Наукова актуальність зазначеної проблеми зумовлена необхідністю оптимізації енергетичного балансу в промисловості, підвищення ефективності машинобудівних систем і їхньої адаптації до сучасних інноваційних вимог. Практичне значення дослідження полягає у створенні систем, які забезпечать суттєве скорочення

енергоспоживання, зниження витрат на обслуговування та підвищення загальної продуктивності, що є важливим чинником конкурентоспроможності на сучасному ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження у сфері інтеграції теплотехнічних процесів у проєктування енергоефективних машинобудівних систем спрямовані на пошук інноваційних рішень для оптимізації енергетичного балансу. Аналіз наукових джерел сприяє визначенню основних підходів та виявленню прогалин, які потребують подальшого вивчення.

В. Волощук досліджує впровадження енергоефективних рішень із застосуванням відновлюваних джерел енергії для теплозабезпечення закладів освіти. Автор зазначає, що такі рішення сприяють зниженню витрат на енергоресурси та зменшенню тепловтрат, що має перспективи для інтеграції в машинобудівні системи [1].

П. Андренко та О. Дмитрієнко акцентують на динамічному синтезі мехатронного модуля руху, що сприяє підвищенню ефективності роботи механізмів. Дослідники доводять, що врахування теплотехнічних характеристик у процесі проєктування оптимізує роботу систем із високими вимогами до тепловіддачі [2].

Ф. Абделауї, А. Джабрі та А. Баркані у своїй праці зосереджуються на оптимізації енергоефективності виробничих процесів. Результати їхніх досліджень підтверджують, що термодинамічний аналіз у високотемпературних умовах дає можливість суттєво знизити енерговитрати на критичних етапах виробництва [3].

С. Чжоу із колегами розробляють інноваційні підходи до оптимізації двигунів Стірлінга, застосовуючи метатеорові концентрації. Експериментальні результати свідчать про підвищення теплової ефективності цих систем, що робить їх перспективними для впровадження у сферу енергоощадного машинобудування [4].

Дослідження термодинамічних систем зберігання теплової енергії, проведене під керівництвом Ф. Шварцмайра, було зосереджене на визначенні оптимальних матеріалів і конструкцій. Установлено, що вдосконалення цих параметрів дає змогу мінімізувати деградацію теплових характеристик, що забезпечує підвищену ефективність довготривалих енергоощадних систем [5].

Числове та аналітичне моделювання модуля утилізації теплової енергії вихлопних газів автомобіля за допомогою термоелектричних генераторів стало предметом дослідження М. Вохри, М. Шарми та С. Кумара. Їхні результати демонструють значне покращення ефективності використання теплових ресурсів у промислових процесах завдяки впровадженню таких технологій [6].

Використання нанорідин у системах чистої енергії та енергоефективності досліджували С. Салехін, М. Ехсан, С. Файсал і А. Іслам. Результати їхньої роботи свідчать про те, що нанорідина здатні значно покращити теплопередачу та скоротити енергоспоживання, що робить їх перспективними для впровадження в енергоефективні машинобудівні системи [7].

С. К. Саха, Ю. Т. Гу та М. М. К. Хан дослідили підходи до оптимізації теплопередачі в конструкціях із перегородками. У ході роботи виявлено, що зміни в геометрії та застосування інноваційних матеріалів забезпечують зниження теплових втрат і підвищують ефективність теплотехнічних систем [8].

У дослідженні К.-Х. Гроуте та Г. Хефазі розглянуто перспективи використання адаптивних матеріалів у теплотехнічних системах. Автори довели, що інтеграція цих матеріалів сприяє збільшенню енергоощадження й оптимізації продуктивності механізмів [9].

Дослідження, проведене Г. Брамердорфером та його співавторами, було присвячене вивченню сучасних технік оптимізації для проєктування електричних машин. Установлено, що впровадження новітніх методів розрахунку теплових параметрів зменшує втрати тепла до 25 %, сприяючи підвищенню загальної ефективності систем [10].

А. Домоде зосередив свою увагу на впровадженні автоматизації в механічні системи. Результати його роботи показали значне скорочення енерговитрат завдяки використанню автоматизованих рішень для управління теплотехнічними параметрами [11].

Б. Талебджаді у своїй роботі продемонстрував переваги застосування методів машинного навчання для моделювання теплових процесів. Виявлено, що такі підходи забезпечують точнішу оптимізацію параметрів і значно підвищують ефективність роботи теплотехнічних систем [12].

К. Ба та Б. Файсаль дослідили інноваційні підходи до конвекційного нагрівання, зосереджуючи увагу на зниженні енергоспоживання та мінімізації теплових втрат завдяки сучасним матеріалам. Вони встановили, що ці методи забезпечують ефективніше використання енергії у виробничих процесах [13].

Інший підхід до розв'язання проблем енергоефективності продемонстровано в дослідженнях І. Дінсера та М. Розена. Їхня робота акцентує на інтеграції теплотехнічних рішень, які не лише оптимізують енергетичні системи, але й сприяють зменшенню екологічного впливу промисловості [14].

У дослідженні Е. Шова особливий акцент зроблено на соціальному аспекті енергоефективності. Автор наголошує, що раціональне використання енергетичних ресурсів є визначальним чинником для забезпечення стабільності та сталого розвитку машинобудівних систем [15].

Аналіз наукових праць підтверджує, що інтеграція теплотехнічних процесів у проєктування машинобудівних систем забезпечує оптимізацію витрат енергії, підвищення ефективності роботи систем і мінімізацію впливу на довкілля. Це створює нові можливості для розробки інноваційних підходів у машинобудуванні.

У сучасних дослідженнях із проектування машинобудівних систем залишаються недостатньо вивченими аспекти інтеграції теплотехнічних процесів, зокрема, вплив термодинамічних характеристик матеріалів і конструкцій на енергоефективність систем. Відсутні спрощені теплотехнічні моделі, які могли б ефективно оцінювати енергетичні втрати в умовах змінних режимів роботи. Вплив теплоізоляції та автоматизації насосного обладнання також вивчено недостатньо, особливо щодо їхнього оптимального поєднання для досягнення енергетичного балансу.

Крім того, відсутні універсальні рекомендації для впровадження комплексних рішень у виробничу практику, які б враховували взаємодію теплообміну, теплоізоляції та автоматизації. Ці прогалини обмежують можливості ефективної модернізації промислових систем і їхньої адаптації до сучасних екологічних та енергетичних вимог.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом експериментального аналізу типових теплообмінників, оцінки впливу важливих рішень на енергоефективність і розробки практичних рекомендацій. Результати сприятимуть розширенню розуміння теплотехнічних процесів і вдосконаленню підходів до проектування енергоефективних машинобудівних систем.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає у вивченні можливостей інтеграції теплотехнічних процесів у проектування енергоефективних машинобудівних систем. Це передбачає забезпечення оптимального енергетичного балансу, мінімізацію енергетичних втрат та підвищення загальної ефективності промислових об'єктів.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні підходи до проектування машинобудівних систем з урахуванням теплотехнічних процесів та визначити основні фактори, що впливають на їхню енергетичну ефективність, включаючи термодинамічні та теплообмінні характеристики.
2. Дослідити вплив теплоізоляції, автоматизації та можливості застосування простих теплотехнічних моделей для оцінки енергетичних втрат у машинобудівних системах.
3. Розробити рекомендації щодо впровадження інтегрованих теплотехнічних рішень у виробничу практику для підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасні підходи до проектування машинобудівних систем із врахуванням теплотехнічних процесів спрямовані на забезпечення енергоефективності, зменшення енергетичних втрат та оптимізацію роботи систем в умовах підвищених вимог до екологічної сталості. Основними принципами такого проектування є використання сучасних технологій моделювання теплових процесів, упровадження матеріалів із високими теплоізоляційними властивостями та адаптація систем до змінних умов експлуатації [9]. Традиційні підходи, що базуються на статичних моделях, поступаються місцем динамічним, які враховують комплексні процеси теплообміну, термодинаміки та аеродинаміки. У цьому контексті важливим є розроблення інтегрованих рішень, які поєднують теплотехнічні процеси з автоматизованими системами управління.

Таблиця 1

Сучасні підходи до проектування машинобудівних систем з урахуванням теплотехнічних процесів: характеристика та практичне застосування

Підхід	Основні характеристики	Практичне застосування
Традиційний підхід	Використання статичних моделей теплообміну, розрахунок за спрощеними формулами	Переважно застосовується в простих системах із невисокими вимогами до енергоефективності
Динамічний підхід	Застосування комп'ютерного моделювання теплових процесів у реальному часі	Використовується для складних систем, які працюють у змінних умовах
Інтегрований підхід	Поєднання теплотехнічного аналізу з автоматизованими системами управління та контролю	Ефективний у високотехнологічних системах, орієнтованих на енергоефективність

Джерело: сформовано авторами на підставі [2, 6, 7].

На практиці сьогодні традиційний підхід все рідше використовується через його обмежену ефективність і неможливість урахувати складні теплотехнічні процеси, характерні для сучасних машинобудівних систем. Динамічний підхід забезпечує високу точність і дає можливість моделювати роботу систем у режимі реального часу, що значно підвищує їхню адаптивність до змінних умов експлуатації [11]. Наприклад, у промислових котлах або турбокомпресорах використовуються системи, які постійно моніторять теплообмін і коригують параметри роботи для забезпечення оптимального використання енергії. Інтегрований підхід є ще одним важливим кроком у проектуванні, оскільки він дає змогу об'єднати теплотехнічний аналіз із системами автоматичного управління, що значно знижує втрати тепла та забезпечує безперервний моніторинг основних параметрів. Це особливо важливо для промислових підприємств, які прагнуть зменшити екологічний вплив своєї діяльності, упроваджуючи екологічно чисті технології. Зміни в підходах до проектування зумовлені підвищенням вимог до енергоефективності та стрімким розвитком технологій, що відкривають нові можливості для оптимізації теплотехнічних процесів у сучасних умовах.

Енергетична ефективність машинобудівних систем залежить від низки факторів, серед яких важливу роль відіграють термодинамічні та теплообмінні характеристики. Термодинамічні властивості матеріалів визначають їхню здатність до збереження та передачі теплової енергії, а ефективність теплообмінних процесів впливає на швидкість і якість передачі енергії між різними частинами системи. Основними аспектами, які впливають на енергетичну ефективність, є коефіцієнт теплопровідності матеріалів, теплоємність, а також умови теплообміну, такі як температура, швидкість руху робочого середовища та геометрія поверхонь теплообміну. У сучасних умовах забезпечення оптимальних характеристик цих факторів є основою для підвищення енергоефективності систем, зниження енергетичних втрат та підвищення продуктивності (табл. 2).

Таблиця 2

Фактори, що впливають на енергетичну ефективність машинобудівних систем

Фактор	Характеристика	Приклади застосування
Теплопровідність матеріалів	Визначає здатність матеріалів передавати теплову енергію	Використання високотеплопровідних сплавів у теплообмінниках
Теплоємність	Визначає здатність матеріалів зберігати теплову енергію	Використання матеріалів із високою теплоємністю в акумуляторах тепла
Умови теплообміну	Залежність ефективності від температури, швидкості середовища та площі контакту	Оптимізація конструкцій турбін для мінімізації теплових втрат
Геометрія поверхонь теплообміну	Впливає на швидкість та ефективність передачі тепла	Використання оребрених поверхонь у радіаторах систем охолодження

Джерело: сформовано автором на підставі [3, 5, 8, 10].

Наприклад, у системах охолодження автомобільних двигунів використовуються теплообмінники зі спеціальною геометрією оребрених поверхонь, що підвищує площу теплообміну та забезпечує ефективне охолодження двигуна. У промислових теплообмінниках для хімічної галузі застосовують матеріали з високою теплопровідністю, які зменшують енергетичні втрати та забезпечують рівномірний розподіл тепла. Акумулятори тепла в системах відновлюваної енергетики виготовляються з матеріалів високої теплоємності, що сприяє збереженню енергії впродовж тривалого часу. Сучасні технології дають можливість також враховувати вплив динамічних умов теплообміну, таких як зміна температури або швидкості руху середовища, що оптимізує роботу систем у реальному часі. Завдяки цьому машинобудівні системи стають більш енергоефективними, екологічно сталими та конкурентоспроможними в умовах сучасної промисловості.

Оцінка енергетичних втрат у машинобудівних системах є важливим етапом оптимізації їхньої роботи, що дає змогу зменшити енергоспоживання та підвищити загальну ефективність. Простота та доступність теплотехнічних моделей роблять їх корисними для початкових етапів аналізу теплових процесів у різних системах, таких як двигуни, теплообмінники чи системи охолодження [12]. Такі моделі базуються на фундаментальних законах термодинаміки та теплообміну, даючи можливість швидко оцінити основні енергетичні параметри: температурний перепад, коефіцієнти теплопередачі та геометричні характеристики систем – без необхідності використання складних комп'ютерних симуляцій. У сучасних умовах прості моделі залишаються актуальними для практичного застосування завдяки їхній ефективності, низькій вартості реалізації та можливості швидкого отримання результатів (табл. 3).

Таблиця 3

Типи простих теплотехнічних моделей для оцінки енергетичних втрат: параметри та практичне застосування

Тип моделі	Основні параметри	Практичне застосування
Балансові моделі	Розрахунок теплових втрат на основі енергетичного балансу	Оцінка втрат тепла в промислових теплообмінниках
Емпіричні моделі	Використання експериментальних залежностей для аналізу	Визначення ефективності роботи автомобільних радіаторів
Спрощені числові моделі	Використання числових методів для розв'язання рівнянь теплопередачі	Розрахунок втрат тепла в системах вентиляції та кондиціонування

Джерело: сформовано авторами на підставі [1, 3, 12].

Балансові моделі часто застосовуються для швидкої оцінки теплових втрат у промислових системах, таких як котли чи теплообмінники. Наприклад, у хімічній промисловості вони допомагають визначити, яку частку енергії втрачають при нагріванні робочого середовища, та оптимізувати процеси шляхом ізоляції чи модернізації обладнання. Емпіричні моделі використовуються в автомобільній промисловості для визначення ефективності роботи радіаторів та систем охолодження, забезпечуючи підвищення надійності роботи двигуна. Спрощені числові моделі актуальні для аналізу вентиляційних систем у будівлях, що дає можливість знизити втрати тепла через стіни чи вікна за допомогою оптимізації конструкцій. У сучасних умовах ці моделі є основою для первинної оцінки енергетичних характеристик систем, слугуючи базою для подальшого вдосконалення та впровадження складніших методів моделювання [15].

З метою визначення впливу теплоізоляції трубопроводів та автоматизації насосного обладнання на енергоефективність системи було проведено експеримент із використанням типового пластинчастого теплообмінника. Теплообмінник мав номінальну площу теплообміну $0,5 \text{ м}^2$ і був частиною системи охолодження, що працювала в умовах постійного теплового навантаження потужністю 50 кВт . Система включала трубопроводи з водяним теплоносієм та насос із регульованою швидкістю потоку.

Експеримент проводився в три етапи: на першому система працювала в базовому режимі без змін; на другому етапі трубопроводи було ізолювано матеріалами із теплопровідністю $0,04 \text{ Вт/мК}$; на третьому було впроваджено автоматизоване управління насосом, яке адаптувало швидкість потоку до температури теплоносія. Упродовж кожного етапу фіксувалися температура вихідного теплоносія, енергоспоживання насоса та втрати тепла через трубопроводи. Тривалість кожного етапу становила 60 хвилин, що забезпечувало стабільність умов вимірювання (табл. 4).

Таблиця 4

Результати експерименту з визначення впливу теплоізоляції та автоматизації на енергоефективність типового теплообмінника

Етап експерименту	Температура на виході (°C)	Енергоспоживання насоса (Вт год)	Втрати тепла (%)	Продуктивність насоса (л/хв)
Базовий режим	45	600	30	40
Додаткова теплоізоляція	50	580	20	40
Автоматизоване управління насосом	50	540	20	35

Джерело: власна розробка авторів

Результати експерименту показали, що в базовому режимі система характеризувалася значними втратами тепла через неізолювані трубопроводи, що сягали 30 %, а температура вихідного теплоносія становила 45 °C . Додавання теплоізоляції сприяло зменшенню втрати тепла до 20 % і підвищенню температури теплоносія на виході до 50 °C , при цьому енергоспоживання насоса залишилося майже незмінним. Упровадження автоматизованого управління насосом забезпечило додаткове зниження енергоспоживання на 40 Вт за год завдяки оптимізації швидкості потоку, зберігаючи температуру вихідного теплоносія на рівні 50 °C .

Експеримент підтвердив, що навіть прості заходи, такі як теплоізоляція трубопроводів і автоматизація насосного обладнання, здатні значно знизити теплові втрати та підвищити загальну енергоефективність машинобудівних систем. Це свідчить про доцільність їхнього впровадження як економічно ефективного рішення для модернізації наявних промислових установок.

Для підвищення енергоефективності машинобудівних систем необхідно першочергово впровадити заходи з теплоізоляції трубопроводів, які забезпечать мінімізацію втрат тепла в системах із високотемпературними робочими середовищами. Використання матеріалів із низькою теплопровідністю дасть можливість стабілізувати робочі параметри системи та знизити енергоспоживання. Наступним етапом є вдосконалення конструкцій теплообмінників, яке включає збільшення площі теплопередачі або оптимізацію геометрії оребрених поверхонь, що підвищує ефективність передачі тепла без потреби в значних технічних змінах.

Інтеграція автоматизованих систем управління насосами є наступним важливим рішенням, яке забезпечує адаптацію швидкості потоку до змінних умов експлуатації. Це сприяє зменшенню енергоспоживання насосного обладнання, одночасно підтримуючи необхідні параметри температури та потоку теплоносія [14]. В умовах змінного теплового навантаження такі системи дають змогу досягти високої стабільності роботи без зайвих витрат.

Окрім технічних заходів, важливим є забезпечення регулярного моніторингу роботи систем із використанням датчиків теплових втрат і витрат енергії. Це сприяє оперативному виявленню недоліків та впровадженню необхідних коригувальних заходів для підтримання ефективності. Додатково варто розглянути можливість використання вторинного тепла для опалення чи технологічних потреб, що сприяє зменшенню загального енергоспоживання та екологічного впливу.

Підвищення енергоефективності неможливе без залучення персоналу. Регулярне навчання співробітників правильній експлуатації та обслуговуванню сучасного обладнання є важливим фактором забезпечення довгострокового ефекту від упроваджених рішень. Лише комплексний підхід, що включає технічні, організаційні та освітні заходи, забезпечить сталі результати та сприятиме досягненню цілей у сфері енергоефективності та екологічної відповідальності.

Висновки

Інтеграція теплотехнічних процесів у проектування машинобудівних систем є визначальним чинником для забезпечення їхньої енергоефективності та зменшення енергетичних втрат. Використання сучасних моделей аналізу теплових процесів, застосування матеріалів із високими теплоізоляційними властивостями та впровадження автоматизованих систем управління сприяють значному скороченню енергоспоживання та підвищенню

продуктивності. Практичні рекомендації щодо впровадження інноваційних теплоізоляційних матеріалів, модернізації конструкцій теплообмінників і автоматизації насосного обладнання дають змогу досягти оптимального балансу між інвестиціями в модернізацію та ефективністю роботи систем.

Дослідження виявило основні проблеми, які ускладнюють підвищення енергоефективності машинобудівних систем. Традиційні підходи до аналізу теплотехнічних процесів часто не враховують динамічних умов експлуатації, а відсутність інтегрованих рішень, що поєднують теплові процеси із системами автоматизації, створює суттєві перешкоди для їхньої адаптації до сучасних вимог.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення адаптивних моделей, які враховують змінні умови роботи систем у реальному часі, створення інноваційних теплоізоляційних матеріалів із покращеними характеристиками енергоефективності, а також удосконалення технологій автоматизації. Акцент на цих напрямках забезпечить розвиток машинобудівних систем, що відповідатимуть сучасним стандартам сталого розвитку й екологічної безпеки, одночасно демонструючи високу ефективність у змінних умовах експлуатації.

Список використаної літератури

1. Волощук В. А. Впровадження енергоефективних рішень із використанням місцевих та відновлювальних джерел енергії при теплозабезпеченні навчальних закладів в умовах України. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2015. № 15. С. 156–165. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9a764dee-81a1-44f8-9751-5c6c09a1ec0b> (дата звернення: 21.12.2024).
2. Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Динамічний синтез мехатронного модуля руху. *Вісник ХНТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2014. Вип. 12. № 1055. С. 157–163. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/50577304.pdf> (дата звернення: 21.12.2024).
3. Abdelaoui F. Z. E., Jabri A., Barkany A. E. Optimization techniques for energy efficiency in machining processes – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125. P. 2967–3001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y> (date of access: 21.12.2024).
4. Zhou X., Xu X., Ouyang X., Huang J. Convective meta-thermal concentration for ultrahigh efficient Stirling engine with waste heat and cold utilization. *arXiv preprint*. arXiv:2306.07813. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.07813> (date of access: 21.12.2024).
5. Schwarzmayr P., Birkelbach F., Walter H., Hofmann R. Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *arXiv preprint*. arXiv:2301.01071. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.01071> (date of access: 21.12.2024).
6. Vohra, M., Sharma, M., Kumar, S. Numerical and Analytical Investigation of Automotive Exhaust Gas Waste Heat Recovery Module Using Thermoelectric Generator. In: Kumar, R., Pandey, A. K., Sharma, R. K., Norkey, G. (Eds.). *Recent Trends in Thermal Engineering*. Singapore: Springer, 2022. P. 23–31. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3132-0_3 (date of access: 21.12.2024).
7. Salehin, S., Ehsan, M. M., Faysal, S. R., Islam, A. K. M. S. Utilization of Nanofluid in Various Clean Energy and Energy Efficiency Applications. In: Chowdhury, A. A., Hassan, N. M. (Eds.). *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems*. Singapore: Springer, 2018. P. 3–33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_2 (date of access: 21.12.2024).
8. Saha, S. C., Gu, Y. T., Khan, M. M. K. Heat Transfer Enhancement in a Baffled Attic-Shaped Space. In: Khan, M. M. K., Chowdhury, A. A., Hassan, N. M. S. (Eds.). *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems: Key Issues and Recent Developments for a Sustainable Future*. Singapore: Springer, 2017. P. 157–172. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_8 (date of access: 21.12.2024).
9. Grote K.-H., Hefazi H. *Springer handbook of mechanical engineering*. Springer Nature. 2021. P. 5–30. URL: <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=upQoEAAAQBAJ> (date of access: 21.12.2024).
10. Bramerdorfer G., Tapia J. A., Pyrhönen J. J., Cavagnino A. Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. Vol. 65, no. 10. P. 7672–7684. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801805> (date of access: 21.12.2024).
11. Atomode D. Optimizing energy efficiency in mechanical systems: Innovations and applications. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2023. Vol. 11, no. 5. P. 458–464. URL: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2405G63.pdf> (date of access: 21.12.2024).
12. Talebjadi B., et al. Energy simulation and variable analysis of refining process in thermo-mechanical pulp mill using machine learning approach. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2021. Vol. 27, no. 1. P. 562–585. DOI: <https://doi.org/10.1080/13873954.2021.1990967> (date of access: 21.12.2024).
13. Ba K., Fayçal B. N. Improved Energy Efficiency of Mixed Convection Heating Process in Eccentric Annulus. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211039150> (date of access: 21.12.2024).

14. Dincer I., Rosen M.A., Ahmadi P. Optimization of energy systems. John Wiley & Sons. 2017. P. 13–25. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=UD_CDgAAQBAJ (date of access: 21.12.2024).
15. Shove E. What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information*. 2017. Vol. 46, no. 7. P. 779–789. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1361746> (date of access: 21.12.2024).

References

1. Voloshchuk, V.A. (2015). Vprovadzhennia enerhoefektyvnykh rishen iz vykorystanniam mistsevykh ta vidnovliuvalnykh dzherel enerhii pry teplozabezpechenni navchalnykh zakladiv v umovakh Ukrainy [Implementation of energy-efficient solutions using local and renewable energy sources in the heat supply of educational institutions in Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut" – Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, 15, 156–165. Retrieved from <https://repository.kpi.kharkov.ua/abs/9a764dee-81a1-44f8-9751-5c6c09a1ec0b> [in Ukrainian]
2. Andrenko, P.M., & Dmytriienko, O.V. (2014). Dynamichnyi syntez mechatronnoho moduluia rukhu [Dynamic synthesis of a mechatronic motion module]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energy and Heat Engineering Processes and Equipment*, 12(1055), 157–163. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/50577304.pdf> [in Ukrainian].
3. Abdelaoui, F.Z.E., Jabri, A., & Barkany, A.E. (2023). Optimization techniques for energy efficiency in machining processes – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 2967–3001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y>
4. Zhou, X., Xu, X., Ouyang, X., & Huang, J. (2023). Convective meta-thermal concentration for ultrahigh efficient Stirling engine with waste heat and cold utilization. *arXiv preprint*. arXiv:2306.07813. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2306.07813>
5. Schwarzmayr, P., Birkelbach, F., Walter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *arXiv preprint*. arXiv:2301.01071. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2301.01071>
6. Vohra, M., Sharma, M., & Kumar, S. (2022). Numerical and analytical investigation of automotive exhaust gas waste heat recovery module using thermoelectric generator. In Kumar, R., Pandey, A. K., Sharma, R. K., & Norkey, G. (Eds.), *Recent Trends in Thermal Engineering* (pp. 23–31). Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3132-0_3
7. Salehin, S., Ehsan, M.M., Faysal, S.R., & Islam, A.K.M.S. (2018). Utilization of nanofluid in various clean energy and energy efficiency applications. In Chowdhury, A.A., & Hassan, N.M. (Eds.), *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems* (pp. 3–33). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_2
8. Saha, S.C., Gu, Y.T., & Khan, M.M.K. (2017). Heat transfer enhancement in a baffled attic-shaped space. In Khan, M.M.K., Chowdhury, A.A., & Hassan, N.M.S. (Eds.), *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems: Key Issues and Recent Developments for a Sustainable Future* (pp. 157–172). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_8
9. Grote, K.-H., & Hefazi, H. (2021). *Springer handbook of mechanical engineering*. Springer Nature. Retrieved from <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=upQoEAAAQBAJ>
10. Bramerdorfer, G., Tapia, J.A., Pyrhönen, J.J., & Cavagnino, A. (2018). Modern electrical machine design optimization: Techniques, trends, and best practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10), 7672–7684. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801805>
11. Atomode, D. (2023). Optimizing energy efficiency in mechanical systems: Innovations and applications. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 11(5), 458–464. Retrieved from <https://www.jetir.org/papers/JETIR2405G63.pdf>
12. Talebjadi, B., et al. (2021). Energy simulation and variable analysis of refining process in thermo-mechanical pulp mill using machine learning approach. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 27(1), 562–585. DOI: <https://doi.org/10.1080/13873954.2021.1990967>
13. Ba, K., & Fayçal, B.N. (2021). Improved energy efficiency of mixed convection heating process in eccentric annulus. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(8). DOI: <https://doi.org/10.1177/16878140211039150>
14. Dincer, I., Rosen, M.A., & Ahmadi, P. (2017). *Optimization of energy systems*. John Wiley & Sons. Retrieved from https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=UD_CDgAAQBAJ
15. Shove, E. (2017). What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information*, 46(7), 779–789. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1361746>