

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 1

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ ТА ТЕРМОДИНАМІКИ»

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітня програма «Комп'ютеризоване управління енергетичними системами»
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф.
Б.Б. Самотокіна

Схвалено на засіданні кафедри
робототехніки, електроенергетики
та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
27 серпня 2024 р., протокол № 7
Завідувач кафедри

Розробники: старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики
та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Олександр ПОКЛЯЧЕНКО

Житомир 2024 – 2025 н.р.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 2

МОДУЛЬ 1. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

Змістовий модуль 1

Тема 1. Основні поняття та закони термодинаміки

Поняття термодинамічної системи та робочого тіла.

Термодинамічна система — це сукупність тіл або речовин, які ми розглядаємо як єдине ціле для аналізу процесів теплообміну та перетворення енергії. Вона може бути:

- Закритою (обмінюється лише енергією, але не речовиною з навколишнім середовищем).
- Відкритою (обмінюється і енергією, і речовиною).
- Ізольованою (не обмінюється ні енергією, ні речовиною).

Приклади:

- Електричний котел — термодинамічна система, що отримує електричну енергію та перетворює її на теплову.
- Електрична тепла підлога — система, яка передає тепло від нагрівальних елементів до приміщення.
- ТЕН (трубчастий електронагрівач) — система, що перетворює електричну енергію на тепло через опір провідника.

Робоче тіло — це речовина, яка безпосередньо бере участь у процесі перетворення та перенесення енергії в термодинамічній системі.

Приклади:

- У електричному котлі робочим тілом є вода (або теплоносій), яка нагрівається ТЕНом.
- У теплій підлозі робочим тілом може бути бетонна стяжка чи повітря в приміщенні, що приймає тепло від кабелів.
- У ТЕНі робочим тілом виступає металевий провідник (спіраль), який нагрівається завдяки електричному струму, а також рідина чи газ, що приймає тепло.

Параметри стану.

Параметри стану — це фізичні величини, які однозначно характеризують стан термодинамічної системи і не залежать від її передісторії. Вони визначаються лише початковим та кінцевим станом системи.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 3

Приклади:

температура, тиск, об'єм, маса, густина, внутрішня енергія.

! - Тепло та робота не є параметрами стану, бо залежать від способу переходу системи з одного стану в інший.

Приклади:

Пристрій	Основні параметри стану	Інтенсивні	Екстенсивні
Електричний котел	Температура води, тиск пари, густина теплоносія	Температура, тиск	Маса води, об'єм бака, внутрішня енергія
Електрична тепла підлога	Температура кабелю, температура стяжки, тепловий потік	Температура поверхні, тепловий потік	Маса бетону, об'єм приміщення
ТЕН	Температура спіралі, тепловий потік, електричний струм	Температура, густина струму	Маса нагрівального елемента, кількість переданого тепла

- У котлі важливо контролювати температуру та тиск — це інтенсивні параметри, що визначають безпеку та ефективність роботи.

- У теплій підлозі ключовим є розподіл температури по поверхні (інтенсивний параметр), але також враховується маса та теплоємність бетонної стяжки (екстенсивні параметри).

- У ТЕНі температура спіралі є критичною для довговічності, а кількість тепла, переданого воді чи повітрю, залежить від маси робочого тіла.

Перший і другий закони термодинаміки.

Перший закон термодинаміки:

Зміна внутрішньої енергії системи дорівнює сумі теплоти, переданої системі, та роботи, виконаної над системою:

$$\Delta U = Q + W$$

Приклади:

- У електричному котлі: електрична енергія перетворюється на теплову через ТЕН. Тепло Q передається воді, внутрішня енергія води зростає, а робота W може проявлятися у вигляді тиску пари.

- У теплій підлозі: електрична енергія перетворюється на тепло, яке передається бетонній стяжці та повітрю. Зміна внутрішньої енергії системи проявляється у підвищенні температури приміщення.

- У ТЕНі: електричний струм виконує роботу над електронним потоком у

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 4

провіднику, що виділяє тепло. Це тепло передається робочому тілу (воді, повітрю), збільшуючи його внутрішню енергію.

Другий закон термодинаміки:

Неможливо створити теплову машину, яка б повністю перетворювала теплоту в роботу без втрат. У будь-якому процесі частина енергії переходить у форму ентропії (непорядкованої енергії).

Наприклад:

- У електричному котлі: не вся електрична енергія перетворюється на корисне тепло для нагрівання води. Частина втрачається у вигляді теплових втрат через корпус, труби, навколишнє середовище.

- У теплій підлозі: тепло не повністю передається повітрю кімнати — частина йде в ґрунт або нижні поверхи. Це приклад неминучих втрат, що підтверджує другий закон.

- У ТЕНі: окрім корисного тепла, виникають втрати на випромінювання та нагрівання навколишніх конструкцій.

Таким чином, перший закон описує кількісний баланс енергії, а другий закон — якісні обмеження її перетворення.

Термодинамічні процеси та цикли. Енергетичні баланси.

Термодинамічний процес — це зміна стану системи, що супроводжується зміною її параметрів (температури, тиску, об'єму, внутрішньої енергії).

Основні типи термодинамічних процесів:

- Ізотермічний ($T = \text{const}$) — температура не змінюється, але змінюється об'єм і тиск.

- Ізобарний ($p = \text{const}$) — тиск постійний, змінюється температура та об'єм.

- Ізохорний ($V = \text{const}$) — об'єм незмінний, змінюється температура та тиск.

- Адіабатичний ($Q = 0$) — теплота не передається, зміна внутрішньої енергії відбувається лише за рахунок роботи.

Приклади:

- У електричному котлі нагрівання води відбувається при майже постійному об'ємі (ізохорний процес).

- У теплій підлозі передача тепла бетонній стяжці та повітрю — приклад ізобарного процесу (тиск повітря практично незмінний).

- У ТЕНі нагрівання спіралі відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем у короткі моменти — наближено адіабатичний процес.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміна 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 5

Енергетичні баланси

Енергетичний баланс описує співвідношення між отриманою, використаною та втраченою енергією.

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{корисне}} + Q_{\text{втрати}}$$

Приклади:

- Електричний котел: електрична енергія → теплота води + втрати через корпус і труби.
- Тепла підлога: електрична енергія → теплота стяжки та повітря + втрати в ґрунт.
- ТЕН: електрична енергія → теплота робочого тіла + втрати на випромінювання та нагрівання навколишніх конструкцій.

Пристрій	Тип процесу	Цикл роботи	Енергетичний баланс
Електричний котел	Ізохорний	Нагрівання– охолодження води	Електрична енергія = теплота води + втрати
Електрична тепла підлога	Ізобарний	Добовий цикл нагрівання– охолодження	Електрична енергія = теплота стяжки + втрати
ТЕН	Адiabатичний (наближено)	Періоди вмикання– вимикання	Електрична енергія = теплота робочого тіла + втрати

Тема 2. Термодинамічні властивості робочих тіл

Ідеальні та реальні гази.

Ідеальний газ — це теоретична модель, яка спрощує опис поведінки газів. Основні припущення:

- Молекули вважаються матеріальними точками, їх власний об'єм зневажливо малий.
- Міжмолекулярні сили відсутні (немає взаємодії між частинками).
- Усі зіткнення молекул — абсолютно пружні.
- Внутрішня енергія газу визначається лише кінетичною енергією молекул.

Пара, рідини.

Пара — це газоподібний стан речовини, у який переходять рідини (випаровування) або тверді тіла (сублімація).

- **Випаровування** — процес утворення пари з поверхні рідини, що відбувається за будь-якої температури.
- **Кипіння** — інтенсивне пароутворення по всьому об'єму рідини при досягненні

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 6

температури кипіння.

- Конденсація — перехід пари назад у рідину при охолодженні або стисканні.

Приклади:

- У електричному котлі вода перетворюється на пару. При низькому тиску її можна описати як ідеальний газ, а при високому — як реальний.
- У ТЕНі нагрівання рідини може призвести до утворення пари, яка далі використовується для теплопередачі.

Рідина — агрегатний стан речовини, в якому молекули мають сильну міжмолекулярну взаємодію, але можуть переміщатися одна відносно одної.

- Рідини мають певний об'єм, але не мають власної форми (приймають форму посудини).
- Характерні властивості: в'язкість, поверхневий натяг, теплопровідність.
- При нагріванні рідина може переходити в пару, а при охолодженні — у тверде тіло.

Приклади:

- У теплій підлозі тепло передається через бетонну стяжку та повітря, але якщо система водяна — робочим тілом є рідина (вода або антифриз).
- У котлі рідина (вода) є основним робочим тілом, яке накопичує тепло та може переходити в пару.

У термодинаміці рідини та пари розглядаються як ключові робочі тіла, що забезпечують передачу та перетворення енергії.

Рівняння стану.

Рівняння стану ідеального газу:

$$pV = nRT$$

де p — тиск, V — об'єм, n — кількість речовини, R — універсальна газова стала, T — температура.

Реальний газ — це фактична поведінка газів, яка враховує:

- Наявність міжмолекулярних сил (притягання та відштовхування).
- Скінченний об'єм молекул.
- Відхилення від закону Бойля–Маріотта та рівняння Клапейрона при високих тисках і низьких температурах.

Для опису реальних газів використовують **рівняння Ван-дер-Ваальса**:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT$$

де a і b — поправки на міжмолекулярні сили та власний об'єм молекул.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміна 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 7

Приклади:

- Електричний котел: якщо вода перетворюється на пару, то при низькому тиску пару можна описати як ідеальний газ. Але при високому тиску та температурі — це вже реальний газ, і потрібні поправки Ван-дер-Ваальса.

- Електрична тепла підлога: повітря в приміщенні можна вважати ідеальним газом для розрахунків теплового комфорту, оскільки відхилення незначні.

- ТЕН: при нагріванні газів (наприклад, у сушильних установках) поведінка газу залежить від умов — при нормальних параметрах він близький до ідеального, а при високих тисках і температурах — реальний.

Таким чином, ідеальний газ — це математична модель для спрощення розрахунків, а реальний газ — фактична поведінка речовини, яку враховують у практичних інженерних задачах.

Термодинамічні діаграми.

Термодинамічна діаграма — це графічне зображення залежності між параметрами стану системи (тиск p , об'єм V , температура T , ентропія S , ентальпія h тощо).

- Кожна точка на діаграмі відповідає певному рівноважному стану системи.
- Лінія на діаграмі відображає термодинамічний процес.
- Використовуються для аналізу роботи теплових машин, котлів, компресорів, турбін, а також для розрахунків у теплотехніці та електротехніці.

Основні типи термодинамічних діаграм:

- p – V діаграма (тиск–об'єм): показує процеси розширення та стискання газів.
- T – S діаграма (температура–ентропія): використовується для аналізу циклів Карно, Ранкіна, холодильних машин.
- h – S діаграма (діаграма Мольє): застосовується для води та водяної пари, особливо у парових котлах і турбінах.
- $\lg p$ – $\lg V$ діаграма: для дослідження політропних процесів.

Приклади:

- Електричний котел: процес нагрівання води та утворення пари можна відобразити на h – S діаграмі, де видно зміну ентальпії та ентропії.

- Електрична тепла підлога: розподіл температури в системі можна аналізувати через T – S діаграму, що показує передачу тепла від кабелів до приміщення.

- ТЕН: нагрівання рідини чи газу можна представити на p – V діаграмі, якщо враховувати зміну тиску та об'єму при нагріванні.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 8

Термодинамічні діаграми — це універсальний інструмент для аналізу теплових процесів, що дозволяє наочно відстежувати зміни стану системи.

Вологе повітря та його властивості.

Вологе повітря — це суміш сухого повітря та водяної пари. Його стан визначається температурою, тиском та вмістом водяної пари.

- Сухе повітря — газова суміш (переважно азот і кисень).
- Водяна пара — газоподібний стан води, що міститься в атмосфері.
- Вологість повітря суттєво впливає на теплообмін, комфорт людини та ефективність роботи технічних систем.

Основні параметри вологого повітря:

- Абсолютна вологість — маса водяної пари в одиниці об'єму повітря (г/м³).
- Відносна вологість — відношення фактичного вмісту пари до максимально можливого при даній температурі (%).
- Температура точки роси — температура, при якій водяна пара починає конденсуватися.
- Ентальпія вологого повітря — сумарна теплова енергія сухого повітря та водяної пари.

Приклади:

- Електричний котел: при нагріванні води утворюється пара, яка може підвищувати вологість повітря в приміщенні. Це впливає на тепловий комфорт та енергетичний баланс.
- Електрична тепла підлога: нагрівання повітря змінює його здатність утримувати водяну пару. При підвищенні температури відносна вологість зменшується, що може викликати сухість у приміщенні.
- ТЕН: використовується для випаровування води у сушильних установках. Тут вологе повітря є робочим середовищем, і важливо враховувати його ентальпію та точку роси.

Параметр	Значення для вологого повітря	Приклад застосування
Абсолютна вологість	г/м ³	Визначення кількості пари у котлі
Відносна вологість	%	Контроль мікроклімату при теплій підлозі
Точка роси	°C	Запобігання конденсації на стінах
Ентальпія	кДж/кг	Розрахунок сушильних процесів з ТЕНами

Вологе повітря визначає ефективність теплообміну, комфорт та енергетичні витрати.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 9

Практичні приклади з енергетики.

Пристрій	Тип процесу	Енергетичний баланс	Практичне застосування
Електричний котел	Ізохорний (нагрівання води при постійному об'ємі).	Електрична енергія = теплота води + втрати	Централізоване та індивідуальне опалення, гарячого водопостачання.
Електрична тепла підлога	Ізобарний (тиск повітря практично незмінний).	Електрична енергія = теплота стяжки + втрати	Створення комфортного мікроклімату, рівномірний розподіл тепла в приміщенні.
ТЕН	Адіабатичний (наближено, у короткі моменти нагрівання спіралі).	Електрична енергія = теплота робочого тіла + втрати	Застосовуються у бойлерах, сушильних установках, системах вентиляції та кондиціонування.
Сушильні установки	Ізобарний	Електрична енергія = теплота повітря + енергія випаровування	Технологічні процеси сушіння речовин в промисловості.

- У сушильних установках із ТЕНами вологе повітря є робочим середовищем.
- Енергетичний баланс: електрична енергія → теплота повітря + енергія випаровування води.
- Практичне значення: використовується у харчовій промисловості, деревообробці, будівництві.

Тема 3. Теплові процеси в енергетичних установках

Ізотермічні, ізобарні, ізохорні та адіабатні процеси.

Ці чотири процеси є базовими в термодинаміці й часто зустрічаються в енергетиці та електротехніці. Розглянемо їх докладніше.

Ізотермічний процес ($T = \text{const}$)

- Суть: температура системи залишається сталою, внутрішня енергія не змінюється.
- Рівняння:

$$pV = \text{const}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 10

Приклад:

У системах кондиціонування чи вентиляції повітря може стискатися або розширюватися без зміни температури (завдяки теплообміну з навколишнім середовищем).

Ізобарний процес ($p = \text{const}$)

- Суть: тиск залишається сталим, змінюються температура та об'єм.

- Рівняння:

$$\frac{V}{T} = \text{const}$$

Приклад:

У теплій підлозі нагрівання повітря відбувається при практично незмінному атмосферному тиску. Об'єм повітря трохи зростає, температура підвищується.

Ізохорний процес ($V = \text{const}$)

- Суть: об'єм незмінний, змінюються температура та тиск.

- Рівняння:

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

Приклад:

У електричному котлі вода нагрівається в замкненому баку. Об'єм практично постійний, але температура і тиск зростають.

Адіабатичний процес ($Q = 0$)

- Суть: теплота не передається системі чи від системи, зміна внутрішньої енергії відбувається лише за рахунок роботи.

- Рівняння:

$$pV^\gamma = \text{const}$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

де γ – показник адіабати.

Приклад:

У ТЕНі при швидкому нагріванні спіралі можна наближено вважати, що теплообмін із навколишнім середовищем відсутній. Це приклад короткочасного адіабатичного процесу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 11

Термодинамічні цикли.

Термодинамічний цикл — це послідовність процесів (ізотермічних, ізобарних, ізохорних, адіабатичних), після яких система повертається у початковий стан.

- У циклі система може виконувати роботу, передавати або отримувати тепло.
- Цикли лежать в основі роботи теплових машин, холодильників, турбін, котлів.

Основні відомі термодинамічні цикли:

- **Цикл Карно** — ідеалізований цикл, що складається з двох ізотермічних і двох адіабатичних процесів. Він задає теоретичну межу ефективності теплових машин.
- **Цикл Ранкіна** — використовується для парових турбін і котлів. Включає випаровування води, розширення пари, конденсацію та стискання.
- **Цикл Отто** — характерний для бензинових двигунів. Складається з ізохорних і адіабатичних процесів.
- **Цикл Дизеля** — застосовується у дизельних двигунах, включає ізобарний процес згоряння.
- **Холодильний цикл (Карно або реальний)** — включає стискання, конденсацію, розширення та випаровування робочого тіла.

Приклади:

- Електричний котел: можна розглядати як частину циклу Ранкіна — вода нагрівається, перетворюється на пару, яка може виконувати роботу (наприклад, у турбіні), а потім конденсується.
- Електрична тепла підлога: добовий цикл нагрівання–охолодження повітря в приміщенні можна трактувати як термодинамічний цикл, де джерелом енергії є електричний струм.
- ТЕН: робота ТЕНу у сушильних установках створює цикл випаровування–конденсації води в повітрі.

Термодинамічні цикли в теплоелектроенергетиці є фундаментальним інструментом для аналізу енергетичних систем, що дозволяє зрозуміти, як електрична енергія перетворюється на тепло, роботу чи охолодження.

Енергетичний баланс циклу:

У будь-якому циклі діє перший і другий закони термодинаміки:

$$Q_{\text{підведене}} = W_{\text{корисна}} + Q_{\text{втрати}}$$

- Частина енергії перетворюється на корисну роботу або тепло.
- Частина неминуче втрачається (ентропія зростає).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 12

Перетворення енергії в теплових та електроенергетичних системах.

Перетворення енергії — це процес переходу одного виду енергії в інший. У теплових та електроенергетичних системах найчастіше відбувається трансформація електричної енергії у теплову, а також навпаки — теплова енергія може бути використана для виробництва електричної.

Основні види перетворень:

- Електрична → теплова

- Відбувається у нагрівальних елементах (ТЕНах, кабелях теплої підлоги, електричних котлах).
- Механізм: електричний струм проходить через провідник із певним опором, виділяючи тепло (ефект Джоуля–Ленца).

- Теплова → електрична

- Реалізується у теплових електростанціях (ТЕС), атомних електростанціях (АЕС), геотермальних установках.
- Механізм: теплова енергія робочого тіла (пари, газу) використовується для обертання турбіни, яка приводить генератор.

- Електрична → механічна → теплова

- Наприклад, у компресорах чи насосах електрична енергія перетворюється на механічну, а далі частково на теплову через тертя та роботу з рідиною чи газом.

Типові варіанти перетворень енергії:

- Електричний котел: електрична енергія → теплова енергія води.
- Електрична тепла підлога: електрична енергія → теплова енергія бетонної стяжки та повітря.
- ТЕН: електрична енергія → теплова енергія робочого тіла (рідини чи газу).
- ТЕС: теплова енергія пари → механічна енергія турбіни → електрична енергія генератора.

При аналізі процесів перетворення енергії в теплоелектроустановках ажливо враховувати не лише баланс енергії, але й ефективність перетворення, адже втрати неминучі через другий закон термодинаміки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 13

Тема 4. Енергоефективність та втрати в термодинамічних процесах

ККД теплових процесів і установок.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) — це відношення корисної енергії (роботи чи тепла), отриманої від процесу або установки, до загальної енергії, витраченої на цей процес:

$$\eta = \frac{E_{\text{корисне}}}{E_{\text{вхідне}}} \cdot 100\%$$

ККД показує, наскільки ефективно система перетворює енергію без втрат.

ККД теплових процесів:

- Ізотермічний процес: ККД залежить від того, наскільки ефективно тепло передається без додаткових втрат.
- Ізобарний процес: втрати виникають через теплопередачу в навколишнє середовище, тому ККД завжди менший за 100%.
- Ізохорний процес: енергія йде на зміну внутрішньої енергії, але втрати тепла через стінки знижують ККД.
- Адіабатичний процес: теоретично найбільш ефективний, бо теплота не передається назовні, але в реальних умовах завжди є втрати.

ККД типових теплових установок:

- Електричний котел:

- Вхідна енергія — електрична.
- Корисна енергія — теплота води.
- ККД \approx 95–99%, втрати через корпус і труби.

- Електрична тепла підлога:

- Вхідна енергія — електрична.
- Корисна енергія — теплота стяжки та повітря.
- ККД \approx 90–95%, втрати йдуть у ґрунт або нижні поверхи.

- ТЕН:

- Вхідна енергія — електрична.
- Корисна енергія — теплота робочого тіла (рідини чи газу).
- ККД \approx 95–98%, втрати на випромінювання та нагрівання корпусу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 14

- ТЕС (теплова електростанція):

- Вхідна енергія — теплота від спалювання палива.
- Корисна енергія — електрична енергія генератора.
- ККД $\approx 35\text{--}45\%$, решта енергії йде у вигляді втрат (тепло в навколишнє середовище, димові гази).

- АЕС (атомна електростанція):

- Вхідна енергія — теплота від ядерної реакції.
- Корисна енергія — електрична.
- ККД $\approx 30\text{--}35\%$, обмежений законами термодинаміки та безпекою.

ККД теплових процесів і установок залежить від типу перетворення енергії та технічних умов. Найвищий ККД мають електричні нагрівальні установки (котли, ТЕНи), бо вони безпосередньо перетворюють електричну енергію на тепло. Найнижчий — у великих теплових і атомних електростанціях, де значна частина енергії втрачається через неминучі обмеження другого закону термодинаміки.

Джерела теплових втрат.

Теплові втрати — це частина енергії, яка не використовується за призначенням у теплових чи електроенергетичних системах і переходить у навколишнє середовище. Вони знижують ефективність роботи установки та зменшують її ККД.

Основні джерела теплових втрат:

- **Через теплопровідність**
 - Втрати тепла через стінки котлів, труб, корпусів нагрівальних елементів.
- **Через конвекцію**
 - Винос тепла потоками повітря або рідини, які контактують із поверхнею установки.
- **Через теплове випромінювання**
 - Втрати у вигляді інфрачервоного випромінювання від нагрітих поверхонь.
- **Втрати при передачі енергії**
 - Неєфективна ізоляція кабелів, трубопроводів, теплообмінників.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 15

- Втрати в робочому середовищі

- Частина тепла йде на нагрівання навколишніх конструкцій, ґрунту, приміщення, а не на корисний процес.

- Втрати при неповному використанні енергії

- Наприклад, у котлі частина теплоти йде з паром чи газами, які не використовуються.

Приклади з практики:

- Електричний котел: втрати через корпус, труби, неповне використання теплоти пари.

- Електрична тепла підлога: втрати тепла в ґрунт або нижні поверхи, якщо ізоляція недостатня.

- ТЕН: втрати на випромінювання та нагрівання корпусу, а також у навколишнє середовище.

- ТЕС та АЕС: значні втрати тепла у вигляді відпрацьованої пари, охолоджувальної води, димових газів.

Теплові втрати є неминучим наслідком роботи будь-якої системи, але їх можна мінімізувати за допомогою теплоізоляції, оптимізації конструкцій та правильного режиму експлуатації.

Методи аналізу та зменшення втрат.

Щоб зрозуміти, де і як система втрачає тепло, застосовують такі підходи:

- **Тепловізійний контроль** — використання тепловізорів для виявлення зон підвищених втрат через корпуси, труби, ізоляцію.

- **Енергетичний баланс** — складання рівняння:

- **Моделювання процесів** — використання термодинамічних діаграм (p - V , T - S , h - S) для оцінки ефективності.

- **Вимірювання параметрів** — контроль температури, тиску, витрат теплоносія, що дозволяє виявити неефективні ділянки.

- **Аналіз ізоляції** — перевірка теплопровідності матеріалів, товщини та стану теплоізоляції.

Методи зменшення теплових втрат:

- **Покращення теплоізоляції**

- Використання сучасних матеріалів (мінеральна вата, пінополіуретан, керамічні покриття).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 16

- Оптимізація конструкції

- Зменшення площі тепловіддаючих поверхонь, застосування багатошарових стінок.

- Зниження теплового випромінювання

- Використання відбивних екранів, спеціальних покриттів.

- Зменшення конвекційних втрат

- Герметизація систем, контроль потоків повітря.

- Рекуперація тепла

- Використання теплообмінників для повернення частини втрат у систему.

- Автоматизація та контроль

- Використання датчиків і систем керування для підтримання оптимальних режимів роботи.

Приклади:

- Електричний котел: застосування теплоізоляції бака та труб, рекуперація тепла від димових газів.

- Електрична тепла підлога: використання теплоізоляційних підкладок, щоб тепло не йшло в ґрунт.

- ТЕН: нанесення керамічних покриттів для зменшення випромінювання, оптимізація конструкції корпусу.

- ТЕС та АЕС: використання конденсаторів і теплообмінників для утилізації відпрацьованої пари.

Аналіз теплових втрат дозволяє визначити слабкі місця системи, а їх зменшення — підвищити ККД та економічність роботи. Найефективніші методи — це теплоізоляція, рекуперація та автоматизація, які застосовуються як у побутових, так і в промислових енергетичних установках.

Роль термодинаміки в енергозбереженні.

Термодинаміка є фундаментальною наукою для аналізу, оптимізації та зменшення енергетичних витрат у теплових і електроенергетичних системах. Вона дозволяє:

- Визначати ефективність перетворення енергії.

- Оцінювати втрати та шукати шляхи їх мінімізації.

- Формувати алгоритми енергозбереження на основі законів термодинаміки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 17

Основні аспекти енергозбереження через термодинаміку:

- Перший закон термодинаміки (закон збереження енергії): допомагає скласти енергетичний баланс і визначити, куди йде кожна частка енергії.
- Другий закон термодинаміки (ентропія): показує неминучість втрат і обмежує максимальний ККД установок.
- Аналіз циклів (Карно, Ранкіна, Отто, Дизеля): дозволяє оцінити ефективність теплових машин і знайти оптимальні режими роботи.
- Вологе повітря та теплообмін: контроль параметрів мікроклімату зменшує зайві витрати енергії на опалення чи охолодження.

Приклади з енергетики:

- Електричний котел: термодинамічний аналіз дозволяє мінімізувати втрати через корпус і труби, підвищуючи ККД до 95–99%.
- Електрична тепла підлога: правильний розрахунок теплоізоляції зменшує втрати в ґрунт і підвищує ефективність системи.
- ТЕС та АЕС: термодинамічні цикли (Ранкіна) застосовуються для оптимізації виробництва електроенергії, зменшення втрат у турбінах і конденсаторах.
- Сушильні установки з ТЕНами: аналіз вологого повітря та його ентальпії дозволяє економити енергію при випаровуванні.

Методи енергозбереження на основі термодинаміки:

- Оптимізація теплових процесів: вибір правильного типу процесу (ізобарний, ізохорний, адіабатичний) для конкретної задачі.
- Зменшення втрат: теплоізоляція, рекуперація тепла, герметизація систем.
- Автоматизація: підтримання оптимальних параметрів (температури, тиску, вологості) для зниження зайвих витрат.
- Використання діаграм (p – V , T – S , h – S): наочний аналіз процесів для пошуку точок оптимізації.

Роль термодинаміки в енергозбереженні полягає у системному аналізі процесів, визначенні джерел втрат та розробці методів їх мінімізації. Вона є ключем до підвищення ефективності як побутових систем (котли, теплі підлоги), так і великих енергетичних установок (ТЕС, АЕС).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 18

МОДУЛЬ 2. ТЕПЛООБМІН ТА ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Змістовий модуль 1

Тема 1. Теплопровідність у елементах електроенергетичних систем

Закони теплопровідності.

Теплопровідність — це процес передачі теплової енергії від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих без перенесення речовини. Вона зумовлена хаотичним рухом молекул, атомів чи електронів у матеріалі.

Основний закон теплопровідності (закон Фур'є):

Кількість тепла, що проходить через матеріал, пропорційна градієнту температури та площі поверхні:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

де q — густина теплового потоку ($\text{Вт}/\text{м}^2$), λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), dT/dx — градієнт температури у напрямку теплопередачі.

Суть: тепло завжди рухається від більш нагрітої області до холоднішої.

Закони та принципи теплопровідності:

- **Лінійний закон Фур'є:** тепловий потік прямо пропорційний градієнту температури.
- **Суперпозиція теплових потоків:** якщо є кілька джерел тепла, їхні ефекти додаються.
- **Залежність від матеріалу:** різні речовини мають різний коефіцієнт теплопровідності (наприклад, метали — високий, гази — низький).
- **Температурна залежність:** теплопровідність змінюється з температурою та структурою матеріалу.

Приклади з енергетики:

- Електричний котел: втрати тепла через стінки бака залежать від коефіцієнта теплопровідності матеріалу корпусу.
- Електрична тепла підлога: тепло передається через бетонну стяжку до повітря — важливо враховувати теплопровідність бетону.
- ТЕН: ефективність нагрівання рідини залежить від теплопровідності матеріалу оболонки нагрівача.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 19

- ТЕС та АЕС: теплопровідність матеріалів теплообмінників визначає швидкість передачі тепла від пари до води чи охолоджувальної рідини.

Закони теплопровідності дозволяють розраховувати втрати тепла та оптимізувати конструкції енергетичних систем. Вони є ключовими для підвищення ККД котлів, теплої підлоги, ТЕНів та промислових теплообмінників.

Стаціонарні та нестаціонарні теплові процеси.

Стаціонарний процес — це такий режим теплопередачі, коли температура в кожній точці системи не змінюється з часом, хоча теплові потоки існують.

Характеристика стаціонарного процесу:

- Температурне поле стабільне.
- Тепловий потік постійний у часі.
- Використовується для розрахунків у системах з тривалим сталим режимом роботи.

Приклад:

- Робота електричної теплої підлоги після виходу на робочий режим — температура стяжки та повітря стабілізувалася, тепловий потік постійний.
- Котел у режимі підтримання температури води.

Нестаціонарний процес — це теплопередача, коли температура в точках системи змінюється з часом. Характеристика нестаціонарного процесу:

- Температурне поле змінне.
- Тепловий потік змінюється у часі.
- Важливий для аналізу перехідних режимів (нагрівання, охолодження).

Приклад:

- Початкове нагрівання ТЕНу — температура спіралі та рідини змінюється з часом.
- Запуск котла — вода поступово нагрівається, тиск і температура зростають.
- Добовий цикл теплої підлоги — температура повітря змінюється залежно від часу доби.

Стаціонарні процеси зручні для розрахунків у довготривалому режимі роботи систем.

Нестаціонарні процеси важливі для аналізу перехідних режимів, коли система ще не досягла рівноваги.

У реальних енергетичних установках завжди присутні обидва режими:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 20

спочатку — нестационарний (нагрівання/охолодження), потім — стаціонарний (робочий режим).

Теплопровідність матеріалів.

Теплопровідність матеріалу — це його здатність проводити тепло. Вона характеризується коефіцієнтом теплопровідності λ (Вт/(м·К)), який показує, скільки тепла проходить через одиницю площі матеріалу за одиницю часу при різниці температур у 1 К.

Приклади з енергетики та електротехніки:

- Електричний котел: корпус виготовляють зі сталі, яка має середню теплопровідність, тому потрібна теплоізоляція.
- Електрична тепла підлога: бетонна стяжка проводить тепло до приміщення, але втрати в ґрунт зменшують за допомогою пінополістиролу.
- ТЕН: оболонка часто з нержавіючої сталі, а теплопередача до рідини залежить від теплопровідності матеріалу.
- ТЕС та АЕС: теплообмінники виготовляють із міді чи алюмінію для максимальної ефективності передачі тепла.

Матеріали з високою теплопровідністю (метали) застосовують у теплообмінниках і нагрівачах, а з низькою (повітря, пінополістирол, мінеральна вата) — у теплоізоляції. Правильний вибір матеріалу дозволяє зменшити теплові втрати та підвищити ККД системи.

Таблиця коефіцієнтів теплопровідності для різних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Особливості
Мідь	~380	Дуже висока теплопровідність, використовується у теплообмінниках
Алюміній	~200	Легка, добра теплопровідність, корпуси нагрівачів
Сталь	~50	Середня теплопровідність, корпуси котлів
Бетон	1.2–1.7	Використовується у теплих підлогах
Цегла	0.6–0.8	Будівельні конструкції
Дерево	0.1–0.2	Низька теплопровідність, теплоізоляційні властивості

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 21

Скло	~0.8	Середня теплопровідність
Вода	~0.6	Теплоносій у котлах
Повітря	~0.024	Дуже низька теплопровідність, хороший ізолятор
Мінеральна вата	0.04–0.07	Теплоізоляційний матеріал
Пінополістирол	0.03–0.05	Ефективна теплоізоляція

Розрахунок теплових потоків.

Тепловий потік — це кількість теплової енергії, що проходить через поверхню за одиницю часу. Він характеризує інтенсивність теплопередачі й вимірюється у Вт/м².

Розрахунок теплового потоку через площину:

Якщо температура змінюється лінійно, формула спрощується:

$$q = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta}$$

де: T_1, T_2 — температури поверхонь, δ — товщина матеріалу.

Загальний тепловий потік через площу А:

$$Q = q \cdot A = \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{\delta} \cdot A$$

Приклади можливих напрямів розрахунків теплового потоку:

- Електричний котел: розрахунок теплових втрат через стінки бака зі сталі.
- Електрична тепла підлога: визначення теплового потоку через бетонну стяжку до приміщення.
- ТЕН: оцінка теплопередачі від нагрівального елементу до рідини.
- ТЕС та АЕС: розрахунок теплових потоків у теплообмінниках (мідь, алюміній).

Результати розрахунку теплових потоків дозволяють: оцінити втрати енергії; вибрати оптимальні матеріали; підвищити ККД системи; забезпечити енергозбереження.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 22

Тема 2. Конвекційний теплообмін і системи охолодження

Природна та примусова конвекція.

Конвекція — це процес перенесення тепла потоками рідини або газу. Вона виникає завдяки руху частинок середовища, які переносять енергію від більш нагрітих ділянок до холодніших.

Природна конвекція:

- Виникає без зовнішнього впливу, лише завдяки різниці густини середовища при нагріванні.
- Механізм: нагріте повітря чи рідина стає менш густим і піднімається вгору, а холодніші шари опускаються вниз.

Приклад:

- Нагрівання повітря від електричної теплої підлоги.
- Підйом теплого повітря біля нагрітого ТЕНу.
- Циркуляція води в котлі без насосів.

Примусова конвекція:

- Створюється зовнішнім впливом — вентилятором, насосом, компресором.
- Механізм: рух середовища забезпечується механічними пристроями, що значно підвищує інтенсивність теплообміну.

Приклад:

- Вентилятор у системі кондиціонування.
- Насос у котлі, що примусово циркулює воду.
- Турбіна в ТЕС чи АЕС, яка забезпечує рух пари.

Природна конвекція проста й економна, але менш ефективна.

Примусова конвекція забезпечує інтенсивний теплообмін, проте потребує додаткових витрат енергії.

У сучасних енергетичних системах часто комбінують обидва типи для оптимальної роботи (наприклад, котел із природною циркуляцією + насос для примусової).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 23

Теплообмін у повітрі та рідинах.

Теплообмін — це процес передачі теплової енергії між тілами або середовищами з різною температурою. У повітрі та рідинах він відбувається переважно завдяки конвекції та теплопровідності, а також може супроводжуватися випромінюванням.

Теплообмін у повітрі:

- Повітря має низьку теплопровідність ($\lambda \approx 0.024$, Вт/(м·К)), тому основний механізм — конвекція.
- При нагріванні повітря стає менш густим і піднімається вгору (природна конвекція).
- За допомогою вентиляторів чи кондиціонерів створюється примусова конвекція, що значно підвищує ефективність теплообміну.

Приклади:

- Електрична тепла підлога — нагрівання повітря в приміщенні.
- Кондиціонери та вентиляційні системи — примусова циркуляція повітря.

Теплообмін у рідинах:

- Рідини мають вищу теплопровідність, ніж повітря (наприклад, вода $\lambda \approx 0.6$, Вт/(м·К)).
- Основний механізм — конвекція, яка виникає завдяки різниці густини при нагріванні.
- У замкнених системах часто застосовують насоси для примусової циркуляції теплоносія.

Приклади:

- Електричний котел — нагрівання води та її циркуляція.
- ТЕН у бойлері — передача тепла від нагрівального елемента до рідини.
- Теплообмінники ТЕС та АЕС — передача тепла від пари до води.

У повітрі теплообмін слабший, тому для ефективності часто застосовують примусову конвекцію.

У рідинах теплообмін значно інтенсивніший, що робить їх ефективними теплоносіями в енергетичних системах.

Розуміння механізмів теплообміну дозволяє оптимізувати роботу котлів, бойлерів, теплої підлоги та промислових теплообмінників.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 24

Охолодження електричних машин, трансформаторів, силових перетворювачів.

Електричні машини, трансформатори та силові перетворювачі під час роботи виділяють значну кількість тепла через втрати в обмотках, магнітопроводі та силових елементах. Надмірне нагрівання знижує їхній ККД, скорочує термін служби ізоляції та може призвести до аварій. Тому ефективне охолодження є критично важливим.

Повітряне охолодження (AN, AB):

- Використовується у сухих трансформаторах.
- Тепло відводиться природною або примусовою конвекцією повітря.

Масляне охолодження (ONAN, ONAF):

- Масло переносить тепло від обмоток до стінок бака.
- ONAN — природна циркуляція масла та повітря.
- ONAF — примусове охолодження вентиляторами.

Масляне + водяне охолодження (OFWF):

- Використовується у потужних трансформаторах.
- Вода охолоджує масло через теплообмінники.

Охолодження електричних машин:

- Природне повітряне охолодження: корпус машини віддає тепло навколишньому середовищу.
- Примусове повітряне охолодження: вентилятори або компресори забезпечують циркуляцію повітря.
- Рідинне охолодження: застосовується у великих генераторах та двигунах, де вода або масло циркулює через канали в корпусі.
- Комбіновані системи: поєднання повітряного та рідинного охолодження для високопотужних машин.

Охолодження силових перетворювачів:

- Повітряне охолодження: вентилятори відводять тепло від силових транзисторів та діодів.
- Рідинне охолодження: використовується у високопотужних інверторах та випрямлячах.
- Теплові трубки та радіатори: забезпечують ефективне відведення тепла від напівпровідникових елементів.
- Системи з примусовою циркуляцією: автоматизоване охолодження для стабільної роботи при великих навантаженнях.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 25

Тема 3. Теплове випромінювання та тепловий захист

Основи теплового випромінювання.

Теплове випромінювання — це електромагнітне випромінювання, яке виникає внаслідок теплового руху заряджених частинок у речовині. Будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює енергію у вигляді хвиль, переважно в інфрачервоному діапазоні .

Основні характеристики

- Спектр випромінювання: широкий, охоплює інфрачервоні хвилі (760 нм – 1–2 мм) .
- Абсолютно чорне тіло: ідеалізований об'єкт, що поглинає і випромінює всю енергію без відбиття.
- Реальні тіла: мають коефіцієнт випромінювання < 1 , залежно від матеріалу та температури.

Основні закони теплового випромінювання:

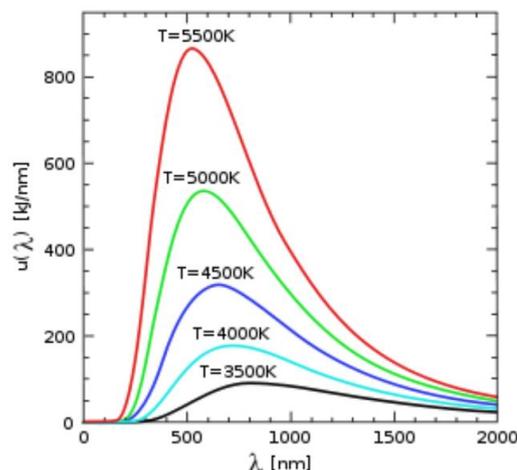
- **Закон Кірхгофа:** відношення випромінювальної здатності до поглинальної є однаковим для всіх тіл при даній температурі.
- **Закон Стефана–Больцмана:**

$$E = \sigma T^4$$

де E — енергія випромінювання, T — температура тіла, σ — стала Стефана–Больцмана.

- **Закон Віна:** максимум інтенсивності випромінювання зміщується до коротших хвиль при зростанні температури.

- **Закон Планка:** описує розподіл енергії випромінювання за довжинами хвиль.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 26

- Електротехніка: втрати тепла у ТЕНах та трансформаторах через інфрачервоне випромінювання.
- Енергетика: теплообмінники враховують випромінювання при високих температурах.
- Будівництво: тепловізори використовують для контролю теплоізоляції.

Теплове випромінювання є універсальним явищем, яке визначає втрати енергії у нагрівальних елементах, трансформаторах та промислових установках. Закони Кірхгофа, Стефана–Больцмана, Віна та Планка дозволяють точно аналізувати та оптимізувати ці процеси.

Радіаційний теплообмін.

Радіаційний теплообмін — це процес передачі теплової енергії у вигляді електромагнітного випромінювання (переважно інфрачервоного), який відбувається між тілами без участі матеріального середовища. На відміну від теплопровідності та конвекції, він може здійснюватися навіть у вакуумі. Радіаційний теплообмін підпорядковується законам Віна, Кірхгофа, Планка.

Особливості радіаційного теплообміну:

- Відбувається безпосередньо між поверхнями, що мають різну температуру.
- Інтенсивність залежить від: температури поверхні; властивостей матеріалу (коефіцієнт випромінювання); геометрії та взаємного розташування тіл.
- Може бути значним при високих температурах (вище 500 °С).

Приклади:

- ТЕНи: втрати тепла через інфрачервоне випромінювання від нагрітих поверхонь.
- Електричні котли: випромінювання від гарячих стінок бака.
- Трансформатори та машини: нагріті корпуси віддають частину тепла випромінюванням.
- ТЕС та АЕС: теплообмінники враховують радіаційний компонент при високих температурах пари та газів.

Радіаційний теплообмін є важливим джерелом теплових втрат у високотемпературних системах. Його аналіз дозволяє правильно вибирати матеріали, покриття та конструкції для зменшення втрат і підвищення ККД установок.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ ОК15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 27

Теплова ізоляція.

Теплова ізоляція — це комплекс заходів і матеріалів, що зменшують теплові втрати в системах, де відбувається нагрівання чи охолодження. Її головна мета — підвищення ККД установок, економія енергії та забезпечення безпеки експлуатації.

Основні принципи теплоізоляції:

- Зменшення теплопровідності: використання матеріалів із низьким коефіцієнтом λ .
- Зменшення конвекції: герметизація систем, щоб уникнути циркуляції повітря.
- Зменшення теплового випромінювання: застосування відбивних екранів і спеціальних покриттів.
- Оптимальна товщина ізоляції: баланс між ефективністю та економічністю.

Матеріали для теплоізоляції:

- Мінеральна вата ($\lambda = 0.04\text{--}0.07$): широко використовується для котлів і труб.
- Пінополістирол ($\lambda = 0.03\text{--}0.05$): ефективний для теплої підлоги та будівельних конструкцій.
- Пінополіуретан ($\lambda = 0.02\text{--}0.03$): високоефективний ізоляційний матеріал.
- Керамічні покриття: застосовуються для зменшення випромінювальних втрат у ТЕНах.
- Повітряні прошарки: природний ізолятор, використовується у багатошарових конструкціях.

Захист обладнання від перегріву.

Приклади застосування:

- Електричний котел: ізоляція бака та труб зменшує втрати тепла у навколишнє середовище.
- Електрична тепла підлога: теплоізоляційні підкладки запобігають втратам у ґрунт.
- ТЕНи: керамічні оболонки зменшують теплове випромінювання.
- ТЕС та АЕС: теплообмінники ізолюють для зменшення втрат і підвищення ефективності.

Теплова ізоляція є ключовим інструментом енергозбереження. Вона дозволяє зменшити втрати, підвищити ККД та продовжити термін служби обладнання. Правильний вибір матеріалу та конструкції ізоляції залежить від типу установки та умов її роботи.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 28

Тема 4. Теплові режими, надійність і безпека електроенергетичного обладнання

Теплові навантаження та перегрів.

Теплове навантаження — це кількість теплової енергії, яку система (електрична машина, трансформатор, силовий перетворювач чи інший пристрій) повинна відвести у навколишнє середовище для нормальної роботи.

Перегрів виникає тоді, коли теплове навантаження перевищує можливості охолодження системи.

Джерела теплових навантажень:

- Втрати у провідниках: нагрівання обмоток через електричний опір (ефект Джоуля–Ленца).
- Втрати у магнітопроводі: гістерезисні та вихрові струми.
- Втрати у напівпровідниках: у силових транзисторах, діодах, тиристорах.
- Втрати на тертя: у підшипниках та механічних частинах електричних машин.
- Втрати на випромінювання та конвекцію: додаткове тепло, що виділяється при високих температурах.

Наслідки перегріву:

- Зниження ККД установки.
- Прискорене старіння та руйнування ізоляції.
- Деформація та пошкодження матеріалів.
- Вихід з ладу силових елементів (транзисторів, діодів).
- Аварійні режими роботи та зниження надійності системи.

Методи аналізу теплових навантажень:

- Енергетичний баланс:

$$Q_{\text{втрати}} = Q_{\text{відведене}} + Q_{\text{накопичене}}$$

- Теплові моделі: використання еквівалентних схем теплопередачі (теплові опори, ємності).
- Тепловізійний контроль: виявлення зон перегріву.
- Моніторинг температури: датчики у трансформаторах, електричних машинах, силових перетворювачах.

Методи зменшення перегріву:

- Покращення охолодження: повітряне, масляне, водяне, комбіноване.
- Застосування теплоізоляції та тепловідводів: мінімізація локальних перегрівів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 29

- Оптимізація конструкції: зменшення втрат у провідниках і магнітопроводах.
- Автоматизація: системи захисту від перегріву (реле температури, датчики).
- Рекуперація тепла: використання відведеного тепла для інших процесів.

Теплові навантаження та перегрів — ключові фактори, що визначають надійність і довговічність електротехнічних систем. Їхній аналіз і контроль дозволяє підвищити ККД, уникнути аварій та забезпечити стабільну роботу обладнання.

Вплив температури на надійність і ресурс обладнання.

Температура є одним із ключових факторів, що визначає довговічність, надійність та ефективність роботи електротехнічного обладнання. Перегрів призводить до прискореного старіння матеріалів, зниження ККД та аварійних режимів.

Вплив температури на різні елементи:

- Ізоляція:

- Висока температура прискорює хімічне старіння ізоляційних матеріалів.
- Зменшується електрична міцність, зростає ризик пробою.

- Провідники:

- Зі збільшенням температури зростає електричний опір → підвищуються втрати на нагрівання.
- Можливе пошкодження лакових покриттів та пайок.

- Магнітопровід:

- Перегрів збільшує втрати на гістерезис і вихрові струми.
- Може призвести до зміни магнітних властивостей сталі.

- Напівпровідникові елементи (транзистори, діоди):

- Перегрів знижує швидкодію та може викликати тепловий пробій.
- Ресурс роботи різко скорочується при перевищенні критичних температур.

- Механічні частини:

- Підшипники та змащувальні матеріали втрачають властивості при перегріві.

Закономірності впливу температури:

- Правило 10 °C: підвищення робочої температури на кожні 10 °C скорочує термін служби ізоляції приблизно вдвічі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 30

- Критичні температури: кожен матеріал має граничну температуру, перевищення якої призводить до необоротних змін.
- Теплові цикли: постійні коливання температури викликають механічні напруження та мікротріщини.

Методи зменшення негативного впливу:

- Ефективне охолодження: повітряне, масляне, водяне, комбіноване.
- Вибір матеріалів: використання ізоляції та напівпровідників із високою термостійкістю.
- Автоматичний контроль: датчики температури, реле перегріву, системи моніторингу.
- Оптимізація режимів роботи: уникнення перевантажень та тривалих пікових навантажень.

Температура є критичним фактором, що визначає ресурс і надійність обладнання. Перегрів скорочує термін служби, підвищує ризик аварій і знижує ефективність. Тому системи охолодження, вибір термостійких матеріалів та автоматичний контроль температури — основні засоби забезпечення довговічності електротехнічних систем.

Пожежна та експлуатаційна безпека. Тепловий моніторинг і діагностика.

Пожежна безпека:

- **Джерела ризику:** перегрів обмоток, трансформаторного масла, силових елементів, кабелів.

- **Наслідки:** займання ізоляції, вибухи трансформаторів, пошкодження обладнання.

Заходи:

- Використання термостійких матеріалів.
- Системи пожежогасіння (газові, порошкові, водяні).
- Автоматичні датчики температури та диму.
- Регулярний контроль стану ізоляції та контактів.

Експлуатаційна безпека:

- **Захист персоналу:** уникнення контакту з перегрітими поверхнями, застосування теплоізоляції.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 31

- **Надійність роботи:** підтримання оптимальних температурних режимів для запобігання аваріям.

- **Організаційні заходи:** інструктаж персоналу, контроль навантажень, планові огляди.

Тепловий моніторинг:

- **Тепловізійний контроль** — виявлення зон перегріву.

- **Датчики температури** — у трансформаторах, електричних машинах, силових перетворювачах.

- **Автоматичні системи моніторингу** — збір даних у реальному часі.

- **Переваги теплового моніторингу:** раннє виявлення дефектів, запобігання аваріям, оптимізація режимів роботи.

Теплова діагностика:

- **Аналіз температурних профілів:** визначення локальних перегрівів.

- **Виявлення дефектів:** пошкодження ізоляції, погані контакти, перевантаження.

- **Прогнозування ресурсу:** оцінка терміну служби обладнання за температурними режимами.

- **Інтеграція з системами захисту:** автоматичне відключення при критичних температурах.

Сфера	Метод / засіб	Приклад
Пожежна безпека	Датчики, пожежогасіння	Трансформаторні підстанції
Експлуатаційна безпека	Ізоляція, інструктаж	Електричні машини
Тепловий моніторинг	Тепловізори, датчики	Силові перетворювачі
Теплова діагностика	Аналіз профілів	Виявлення дефектів у кабелях

Пожежна та експлуатаційна безпека тісно пов'язані з тепловим моніторингом і діагностикою. Своєчасний контроль температури дозволяє запобігти аваріям, продовжити ресурс обладнання та забезпечити безпечну роботу персоналу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 32

Глосарій

№ з/п	Термін державною мовою	Відповідник англійською мовою
2.	Термодинамічна система	Thermodynamic system
3.	Робоче тіло	Working fluid
4.	Параметри стану	State variables
5.	Температура	Temperature
6.	Тиск	Pressure
7.	Об'єм	Volume
8.	Внутрішня енергія	Internal energy
9.	Теплота	Heat
10.	Робота	Work
11.	Перший закон термодинаміки	First law of thermodynamics
12.	Другий закон термодинаміки	Second law of thermodynamics
13.	Термодинамічний процес	Thermodynamic process
14.	Термодинамічний цикл	Thermodynamic cycle
15.	Коефіцієнт корисної дії	Efficiency
16.	Ідеальний газ	Ideal gas
17.	Реальний газ	Real gas
18.	Насичена пара	Saturated steam
19.	Перегріта пара	Superheated steam
20.	Теплообмін	Heat transfer
21.	Теплопровідність	Thermal conductivity
22.	Конвекція	Convection
23.	Теплове випромінювання	Thermal radiation
24.	Тепловий потік	Heat flux
25.	Коефіцієнт тепловіддачі	Heat transfer coefficient
26.	Теплова ізоляція	Thermal insulation
27.	Стаціонарний тепловий режим	Steady-state thermal regime
28.	Нестационарний тепловий режим	Transient thermal regime
29.	Теплові втрати	Heat losses
30.	Система охолодження	Cooling system
31.	Природна конвекція	Natural convection
32.	Примусова конвекція	Forced convection
33.	Температурне поле	Temperature field
34.	Тепловий баланс	Heat balance
35.	Теплова потужність	Thermal power

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ OK15-2024
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 21 / 33</i>

36.	Енергоефективність	Energy efficiency
37.	Теплове навантаження	Thermal load
38.	Теплова стійкість	Thermal stability
39.	Перегрів	Overheating
40.	Теплова деформація	Thermal deformation
41.	Тепловий захист	Thermal protection
42.	Тепловий моніторинг	Thermal monitoring
43.	Теплова діагностика	Thermal diagnostics
44.	Ексергія	Exergy
45.	Ентропія	Entropy
46.	Ентальпія	Enthalpy
47.	Тепловий опір	Thermal resistance
48.	Теплова рівновага	Thermal equilibrium
49.	Теплоємність	Heat capacity
50.	Питома теплоємність	Specific heat capacity

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ ОК15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 34

Рекомендована література

Основна література

1. Вассерман, О. А. Технічна термодинаміка і теплообмін : підручник / О. А. Вассерман, О. Г. Слинко. - Одеса: Фенікс, 2019. - 496 с. Режим доступу: <https://card-file.ontu.edu.ua/items/cb3d3d3c-21df-45ce-a210-5d826d3d8a73>
2. Іволжатова Н.С. Передові системи термомодернізації будівель і споруд : навч. посібник. – Одеса: Гельветика, 2023. – 128с.
3. Дубровська В.В. Термодинаміка та теплообмін: навч. посіб./ В.В. Дубровська, В.І.Шкляр.- К.: НТУУ «КПІ», Вид-во «Політехніка», 2016. – 152 с
4. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Основи теплотехніки: навч. посібник. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2024. 132 с
5. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Основи теплотехніки та термодинаміки» для студентів освітнього ступеня «Бакалавр» денної форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (автор: Покляченко О.В.), 2024. 28 с. Електронне видання (Протокол НМР №4 від 12.06.2024 р.).
6. Методичні рекомендації щодо виконання самостійної роботи з навчальної дисципліни «Основи теплотехніки та термодинаміки» для студентів освітнього ступеня «Бакалавр» денної форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (автор: Покляченко О.В.), 2024. 13 с. Електронне видання (Протокол НМР №4 від 12.06.2024 р.).

Додаткова література

1. Порядок визначення технічної можливості встановлення вузлів розподільного обліку теплової енергії та економічної доцільності встановлення приладів - розподільовачів теплової енергії : Постанова КМУ від 10.10.18 р. № 829 // Все про бухгалтерський облік. – 2018. – №97. – 2018. – С.20-21.
2. Порядок обслуговування внутрішньобудинкових систем теплопостачання, водопостачання, водовідведення та постачання гарячої води : Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України від 15.08.18 р. № 219 // Все про бухгалтерський облік. – 2018. – №102. – 2018. – С.19-21.
3. Подчашинський Ю.О. Електроніка та мікропроцесорна техніка. Цифрова електроніка : навч. посібник. – Житомир : Вид. О.О. Євенок, 2020. – 236 с.
4. Олійник М.Й., Лисяк В.Г., Серета М.С. Енергоощадність та альтернативні джерела енергії: навч. посібник. – Львів : Львівська політехніка, 2020. – 184 с.
5. Закон України «Про охорону праці». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.10- 05.02/141.00.1/Б/ ОК15-2024
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 21 / 35

6. Закон України «Про критичну інфраструктуру». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>

7. Воробйов Л. Й. Оцінювання складової похибки вимірювання теплового потоку, зумовленої нерівномірністю просторової чутливості перетворювача // Метрологія та прилади. – 2020. – №5. – 2020. – С.33-42.

8. Гамеляк І.П., Дмитрієв М.М., Дмитриченко А.М., Волощук Д.В. Енергетичний аудит бітумних баз та асфальтобетонних заводів тепловізійним методом // Автошляховик України. – 2015. – №3. – 2015. – С.35-40.

9. Ільченко А. В. Шляхи зменшення похибки вимірювання витрат палив тепловим витратоміром // Технічна інженерія. – 2023. – №1(91). – 2023. – С.207-213.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Міністерство енергетики України. Режим доступу: <https://www.mev.gov.ua>
2. ДП «НЕК „Укренерго“». Режим доступу: <https://ua.energy>
3. Державна служба України з питань праці (охорона праці та електробезпека). Режим доступу: <https://dsp.gov.ua>
4. Офіційний сайт ТОВ «Магія комфорту». Режим доступу: <https://magic-comfort.com.ua/>
5. Національний орган стандартизації України (ДП «УкрНДНЦ»). Режим доступу: <https://www.ukrndnc.org.ua>
6. Онлайн-платформа стандартів (BudStandart). Режим доступу: <https://online.budstandart.com>
7. Національна бібліотека України ім. Вернадського. Режим доступу: www.nbu.gov.ua
8. Електронний архів наукових та освітніх матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/home>
9. Наукометрична та реферативна база даних Directory of Open Access Journals (DOAJ). Режим доступу: <https://doaj.org/>
10. Electrical Engineering Portal. Режим доступу: <https://electrical-engineering-portal.com>