

Міністерство освіти і науки України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

**Ф.І. Абрамчук**

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

**Конспект лекцій**

2019 р.

## ПЕРЕДМОВА

Курс лекцій «Методи дослідження складних енергетичних систем» читається при підготовці докторів філософії у галузі 14 «Електрична інженерія» спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» згідно освітньо-наукової програми «Енергомашинобудування».

Матеріал курсу лекцій допомагає:

- формувати та розв'язувати складні задачі енергетичного машинобудування, які передбачають проведення досліджень та здійснення інновацій;
- розробляти, застосовувати та удосконалювати математичні моделі, наукові і технічні методи та сучасне комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення задач енергетичного машинобудування;
- аналізувати і розробляти заходи з підвищення ефективності систем і компонентів на основі використання аналітичних методів і методів моделювання в енергетичному машинобудуванні;
- продукувати нові ідеї і розв'язувати комплексні проблеми енергетичного машинобудування.

# Розділ I. УНІВЕРСАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

## *Лекція № 1*

- 1.1. Вступ.
- 1.2. Основні поняття.
- 1.3. Основні методи дослідження складних енергетичних систем.

### **1.1 Вступ**

В курсі лекцій «Методи дослідження складних енергетичних систем» будуть розглядатися тільки наукові методи досліджень.

Науковий метод – це система регулятивних принципів, прийомів і способів, за допомогою яких досягається об'єктивне дослідження дійсності у рамках науково-пізнавальної діяльності, їх можливості і межі застосування інтегруються методологією науки.

Слово «метод» означає шлях до досягнення будь-якої мети. Тому в широкому розумінні слова під методом розуміється сукупність раціональних дій, які необхідно зробити, щоб вирішити поставлену задачу або досягти певної практичної або теоретичної мети.

Формування поняття наукового методу, його ідеалу в якості керівництва до правильного процесу пізнання і способу діяльності пов'язано з виникнення філософії як раціонально-теоретичного типу світогляду, а потім і науки як діяльності людини, що направлена на одержання обґрунтованих і систематизованих об'єктивних знань.

Досвід розвитку науки показав, що результати науково-пізнавальної діяльності визначаються точністю методів що використовуються. Розробка наукових методів представляє собою складний процес, який регулюється і

направляється попередніми даними про об'єкт дослідження. Такі дані про об'єкт є об'єктивною основою методу.

Сьогодні наукове пізнання це інституційно закріплений вид діяльності, в якому вивчення дійсності стає процесом взаємодії дослідників. Ефективність подібної взаємодії забезпечується накопиченням досвіду і знань, що стає можливим за рахунок пізнавальних практик, якими і є методи здійснення науково-пізнавального процесу.

Аналіз процесів наукового пізнання дозволяє виділити два основних типа методів дослідження:

1. Методи, на основі яких будуються як наукове так і практичне знання: універсальні методи дослідження.
2. Методи, які застосовують для наукового пізнання, їх ділять на дві групи:
  - а) емпіричні наукові методи;
  - б) теоретичні наукові методи.

В основі будь-якого методу лежать три основоположних принципи – об'єктивність, систематичність і відтворюваність.

1. Об'єктивність має на увазі відчуження суб'єкта пізнання від його об'єкта, тобто дослідник не дозволяє суб'єктивним представленням впливати на процес наукового пізнання.
2. Систематичність має на увазі впорядкованість науково-пізнавальної діяльності, тобто процес наукового пізнання виконується системним, впорядкованим чином.
3. Відтворюваність має на увазі що всі етапи наукового пізнання можна повторити під керівництвом інших дослідників, одержавши східні непротиворечиві результати і тим самим перевіривши їх достовірність. Якщо результати не відтворюються, то вони ненадійні і не можуть бути достовірними.

Якщо застосування наукових методів не відповідає принципам об'єктивності, систематичності і відтворюваності, то процес наукового пізнання є неможливим, а самі методи втрачають свою ефективність.

## 1.2 Основні поняття

Система – це множина елементів, що знаходяться у відношеннях і зв'язках один з одним. Прикладом систем може бути:

- теорія, наприклад, філософська система Платона;
- класифікація, наприклад, періодична система хімічних елементів Д.І.Менделєєва;
- метод практичної діяльності, наприклад, система Станіславського;
- сукупність об'єктів природи, наприклад, Сонячна система;
- деякі властивості суспільства, наприклад, політична система, екологічна система і т.д.;
- сукупність встановлених норм життя і правил поведінки, наприклад, законодавча система або система моральних цінностей;
- технічна система – штучно створена система, яка призначена для задоволення певних потреб.

Прикладами можуть бути:

1. Продукція виробництва;
2. Пристрій, що потенційно готовий здійснювати корисний ефект;
3. Процес взаємодії з компонентами навколишнього середовища, в результаті якого отримується корисний ефект.

До технічних систем відносяться:

1. Машини;
2. Апарати;
3. Прилади;
4. Споруди;
5. Ручні знаряддя;

6. Елементи у вигляді вузлів, блоків, агрегатів.

В курсі лекцій увага, в основному, звернена на технічні системи. Наприклад, двигун внутрішнього згоряння є складною технічною системою, що виробляє енергію.

Складна технічна система (ДВЗ) складається з більш простих систем:

- система перетворення прямолінійного руху в обертальний (кривошипно-шатунний механізм);
- система газообміну;
- система запалювання;
- система охолодження;
- система змащування;
- система живлення;
- система пуску.

Системи можна кваліфікувати з двох ознак:

1. Малі системи;
2. Великі системи.

Прикладом великої системи є двигун внутрішнього згоряння. До його складу входять малі системи: система перетворення прямолінійного руху в обертальний; система охолодження; система змащування; система живлення; система пуску.

При дослідженні систем використовують різні підходи:

- класичний підхід;
- системний підхід.

Класичний підхід передбачає синтез моделі, тобто, складання моделей складових у цілу модель системи. Недоліком такого підходу є те, що при складанні дуже важко зв'язати складові системи.

У системному підході від загального до складової чітко відслідковується зв'язок між складовими загальної системи. В процесі синтезу моделі на основі системного підходу мета кожної підсистеми підпорядкована загальній меті.

Для дослідження систем застосовується метод моделювання. В основі методу моделювання лежить об'єкт дослідження, в гіпотезі якої необхідно підтвердити аналогії.

Модель – це об'єкт заміник, він повинен бути простим і зручним для дослідження. При дослідженні складних енергетичних систем у більшості випадків використовують метод моделювання. Побудова моделі дозволяє всестороннє вивчати об'єкт дослідження.

### 1.3 Основні методи дослідження складних систем

Методи дослідження складних систем можна поділити на три групи:

1. Універсальні методи дослідження.
2. Емпіричні наукові методи.
3. Теоретичні наукові методи.



## *Лекція № 2*

- 2.1. Аналіз і синтез.
- 2.2. Абстрагування.
- 2.3. Узагальнення.
- 2.4. Індукція і дедукція.
- 2.5. Аналогія.

### 2.1 Аналіз і синтез

Аналіз і синтез – дві універсальні протилежно направлені операції пізнавального процесу:

1. Аналіз – це спосіб пізнання, в якому роз'єднується цілісність предмета на складові частинки (сторони, признаки, властивості або відношення) з метою їх всестороннього вивчення;
2. Синтез – це спосіб пізнання, в якому відбувається з'єднання раніш виділених частин (сторін, при знаків властивостей або відношень) предмета в єдине ціле.

Відрізняють чотири різновиди аналізу і синтезу:

1. Природний аналіз – роз'єднання предметів на частини і природний синтез – об'єднання цих частин в нові предмети у відповідності з можливостями, які існують в природі;
2. Практичний аналіз – роз'єднання предметів на компоненти і практичний синтез – об'єднання їх в цілісні, у відповідності з можливостями практики, які в природі ніколи не були реалізовані;
3. Розумовий аналіз – відділення від предмета того, що ні в природі, ні на практиці зробити неможливо, розумовий синтез – об'єднання того, що у відповідності з законами природи об'єднати неможливо;
4. Метааналіз і метасинтез – це аналіз і синтез знань про світ, на відміну від аналізу і синтезу об'єктивно існуючих речей.



Об'єктивним цих пізнавальних операцій є структурність матеріальних об'єктів, можливість цих елементів до перегрупування, об'єднання і роз'єднання. Аналіз і синтез є найбільш елементарними і простими способами дослідження, які лежать в основі людського мислення, разом з тим, вони є найбільш універсальним способом, що характерний для всіх його рівнів і форм. Іноді вони розглядаються в якості автономних процесів дослідження, хоча в цілому рахується що аналіз і синтез не суперечать одна одному і існують в єдиних формах розумового дослідження.

## 2.2 Абстрагування

Абстрагування – це спосіб розумової діяльності, що закладається у відволіканні від ряду властивостей у відношенні явища, що досліджується з одночасним виділенням властивостей і відношень, які цікавлять дослідника. Результатом абстрагування є створення різного роду абстракцій, які являються як окремо взяті поняття і категорії, так і їх системи. Процес абстрагування носить двоступеневий характер, припускаючи з одного боку, встановлення відносної самостійності окремих властивостей, а з другого боку – виділення властивостей і відношень, які цікавлять дослідника.

Предмети об'єктивної дійсності мають нескінченну множину різних властивостей, зв'язків і відношень. Одні з них схожі між собою і доповнюють один одного, інші ж відмінні і відносно самостійні. В процесі дослідження і практики визначають в першу чергу, що відносну самостійність окремих властивостей виділяють зв'язки, які дуже важливі для розуміння предмета і його сутності. Процес такого виділення припускає, що ці властивості і відношення повинні бути позначеними особливими знаками, які закріплені в уяві в якості абстракцій. Абстрагування – універсальний спосіб пізнання без якого неможливе як наукове, так і звичайне пізнання як на імперичному так і теоретичному рівні дослідження.

### 2.3 Узагальнення

Узагальнення – це спосіб мислення, в результаті якого встановлюються загальні властивості і ознаки об'єктів. Операція узагальнення здійснюється як перехід від простого до складного або простого поняття до загального поняття. Узагальнення здійснюється у тісному зв'язку з абстрагуванням. Під час створення абстракції деяких властивостей або відношення ряду об'єктів, створюються основи для їх об'єднання в єдиний клас. По відношенню до індивідуальних властивостей кожного об'єкту, що входять в цей клас, властивість, що об'єднує їх, виступає як загальна. На певних ступенях дослідження існує межа такому розширенню понять, яка закінчується розробленням філософських категорій, понять, які складають основу наукового знання.

Узагальнення широко застосовується у науці не тільки в імперичному дослідженні і при перших кроках побудови теоретичних знань, але і являється потужним знаряддям побудови самих фундаментальних теорій. У цьому розумінні узагальнення розглядається як перехід від менш загального поняття до більш загального – як перехід від простого знання до більш складного. Рухаючись таким чином, ступенями абстрагування і узагальнення від простого до загального, від менш загального до більш загального знання постійно проникають в суть явища, що вивчається.

### 2.4 Індукція і дедукція

В процесі наукового дослідження, часто приходиться використовувати знання, які відомі, і робити висновки для невідомого. Переходячи від відомого до невідомого, дослідник може використовувати знання про окремі факти підходячи при цьому до відкриття загальних принципів або навпаки, спираючись на загальні принципи роботи, висновки про окремі явища. Такий перехід відбувається за допомогою таких логічних операцій як індукція і дедукція.

1. Індукція – це спосіб судження і метод дослідження, в яких загальний висновок будується на основі окремих посилян.
2. Дедукція – це спосіб судження, за рахунок якого з загальних посилян з необхідністю йде заключення окремого характеру.

Індукція і дедукція широко використовуються в різних сферах наукового дослідження. Вони грають важливу роль при побудові емпіричних знань і переході від емпіричних знань до теоретичних.

Індукція представляє собою вид узагальнень пов'язаних з передбаченням результатів спостереження і експериментів на основі даних існуючого досвіду. Основою індукції є досвід, експеримент і спостереження, в ході яких збираються окремі факти. Далі вивчаючи ці факти, аналізуючи їх, дослідник встановлює загальні і ознаки явищ, які повторюються і входять в певний клас. На основі цих знань, аналізуючи їх, дослідник встановлює загальні риси і ті риси, що повторюються, явищ, які входять в певний клас.

Дедукція відрізняється від індукції прямо протилежним ходом думки і представляє собою перехід від загального до одиночного. В дедукції спираються на загальні знання, формулюють висновок одиничного характеру. Найбільше значення дедукції проявляється у тому випадку, коли в якості загальної посилки виступає не просто індуктивне узагальнення, а нова наукова ідея.

## 2.5 Аналогія

Вивчаючи властивості і признаки явищ, дослідник не може збагнути зразу цілком у всьому об'ємі, а вивчає явище крок за кроком. Вивчаючи властивості предмета дослідник може засвідчити, що вони співпадають з властивостями іншого, добре вивченого предмета. Встановлюючи таке співпадання і находячи, що число співпадань велике, можна зробити припущення, що інші властивості також співпадають. Хід думки такого роду складають основу аналогії.

Аналогія – це спосіб пізнання, при якому на основі співпадання одних ознак припускають співпадання інших. Є дві форми аналогії: асоціативна і логічна аналогії.

Асоціативна аналогія проявляється в основному в психологічних роздумах творчості. Вона носить загальний характер і грає велику роль на початку виникнення наукової ідеї.

Якщо дослідник визнає співпадання ознак з певною вірогідністю, то тут має місце логічна аналогія.

Аналогія має велике значення в якості ілюстрації, доказової бази або пояснення тих чи інших явищ.

## *Лекція № 3*

3.1 Моделювання як метод дослідження складних енергетичних систем.

3.2 Методи моделювання складних енергетичних систем.

### **3.1 Моделювання як метод дослідження складних енергетичних систем**

Моделювання – це вивчення об’єкта шляхом створення і дослідження його копії, що замінює оригінал з тих сторін, що вивчаються. Модель завжди повинна відповідати об’єкту оригіналу – у тих властивостях, які треба вивчити, в той же час відрізняються від нього по ряду інших при знаків, що роблять модель зручною для дослідження. Метод моделювання є універсальним способом вивчення об’єкта, який використовувався ще в давні часи. Використання моделювання в науковому світі диктується необхідністю відкрити такі сторони об’єкта, які неможливо відкрити шляхом безпосереднього вивчення.

Моделі, які застосовуються в дослідженнях діляться на фізичні та математичні.

Фізичні моделі є природними об’єктами, підкоряються в своєму функціонуванні природним законам. Математичні моделі являють собою ідеалізовану модель, що складається з рівнянь, які описують процеси, що проходять в об’єктах.

### **3.2 Методи моделювання складних енергетичних систем**

#### 3.2.1 Основні поняття і принципи

Складна енергетична система складається з підсистем, а підсистема в свою чергу з елементів, наприклад, як приведено на рис. 3.1.

Моделі складу системи			Моделі складу системи		
Система	Підсистема	Елемент	Система	Підсистема	Елемент
Автомобіль	Двигун	Корпусні деталі	Двигун	Корпусні деталі	Блок-картер
		КШМ			Головка циліндра
		ГРМ			Піддон картера
		Трансмісія		Зчеплення	Кривошипно-шатунний механізм
	Коробка передач			Шатун	
	Карданний вал			Колінчастий вал	
	Задній міст			Газорозподільний механізм	Розподільний вал
	Кузов	Двері			Штовхачі
		Капот		Клапан	
		Корпус		Паливна апаратура	Насос
		Рама			Форсунка
					Регулятор
				Паливопроводи	

а)

б)

Рисунок 3.1 – Моделі складу системи: а – автомобіль; б – двигун.

### 3.2.2 Загальні критерії моделювання

При складанні моделі дотримуються таких критеріїв:

- 1) простота і наочність;
- 2) цілеспрямованість моделі;
- 3) надійність;
- 4) зручність управління і спілкування;
- 5) самодостатність;
- 6) адитивність;
- 7) можливість її зміни з метою вдосконалення.

### 3.2.3 Математичне моделювання

Процес побудови і вивчення математичних моделей називається математичним моделюванням. Сьогодні всі технічні науки використовують математичні моделі, тобто, об'єкт дослідження замінюють математичною моделлю, а потім вивчають останню. Зв'язок математичної моделі з реальністю здійснюється за допомогою гіпотез, ідеалізацій і спрощень.

Математична модель це сукупність математичних рівнянь, нерівностей, які описують основні закономірності характерні для процесу, що вивчається, об'єкти або системи. Математичні моделі ділять (класифікують) на:

- лінійні або нелінійні;
- зосереджені або розподілені;
- детерміновані або стохастичні;
- статичні або динамічні;
- дискретні або неперервні.

Приклад. Розглянемо механічну систему, яка складається з пружини, що закріплена з одного кінця і масою  $m$ , що закріплена до вільного кінця пружини. Будемо рахувати, що маса  $m$  може рухатися у напрямі вісі пружини. Побудуємо модель такої системи. Взаємодію маси з пружиною опишемо законом Гука ( $F = -kx$ ), після чого згідно другого закону Ньютона, отримаємо диференціальне рівняння

$$m \cdot \ddot{x} = -kx,$$

де  $\ddot{x}$  – друга похідна від  $x$  по часу  $\ddot{x} = \frac{d^2x}{d\tau^2}$ ;

$\tau$  – час;

$k$  – жорсткість пружини.

Одержане рівняння описує математичну модель фізичної системи. Згідно класифікації ця модель лінійна, детермінована, динамічна, зосереджена, неперервна. В процесі побудови моделі зроблені припущення (відсутність

зрівноважених сил, відсутність тертя і т.д.), які в реальності можуть не виконуватися.

Якщо в праву частину рівняння додати  $\varepsilon \cdot \dot{x}$  (тертя) ( $\varepsilon > 0$  - малий параметр), то одержимо експоненціально затухаючі коливання

$$m\ddot{x} = -kx - \varepsilon\dot{x}.$$

В залежності від малого параметру  $\varepsilon$  затухання будуть швидкими або повільними.

Універсальність моделей. Математичні моделі мають важливу властивість бути універсальними, вони можуть описувати принципово різні явища однією і тією моделлю. Наприклад, розглянуте рівняння коливання маси на пружині може описувати коливання рівня рідини у V-подібній трубці або зміну сили струму в коливальному контурі. Таким чином, вивчаючи одну математичну модель, ми вивчаємо цілий клас явищ, що описує дана модель. Цей ізоморфізм законів, які виражаються математичними моделями в різних сегментах наукових знань, заставив Людвіга фон Берталанфі створити «загальну теорію систем».

Пряма задача моделювання у випадку, коли відома структура і всі її параметри і потрібно провести дослідження моделі для одержання корисних знань про об'єкт.

В простих випадках прямої задачі вирішення зводиться до вирішення диференційного рівняння.

Обернена задача моделювання у випадку, коли відомі можливі моделі, треба вибрати конкретну модель на основі додаткових знань про об'єкт. Частіше структура моделі відома і необхідно визначити невідомі параметри. Додаткова інформація береться в додаткових емпіричних даних або у вимогах до об'єкту.

Комп'ютерні системи моделювання. Для підтримки математичного моделювання розроблені системи комп'ютерної математики. Наприклад, Maple, Mathematica, Mathcad, MATLAB, VisSim та інші. Вони дозволяють створювати



формальні і блочні моделі як простих, так і складних процесів і пристроїв, дозволяють легко змінювати параметри моделей в ході моделювання.

## Лекція № 4

### 4. Математичне моделювання робочих процесів ДВЗ

Серед аналітичних моделей робочих процесів поршневих двигунів своє застосування знайшли моделі, в основі яких лежать ідеальні термодинамічні цикли Отто, Дизеля і Сабате-Тринклера. Ідеальні цикли не в повній мірі відображають реальні фізичні процеси, що проходять в циліндрі поршневого ДВЗ. Основна відмінність ідеального циклу від реального заключається у відмінності законів підведення і відведення теплоти в циклі. Сьогодні розроблено багато методів врахування реального закону тепловиділення. Розглянемо аналітичні методи, що дозволяють одержати якісні характеристики поршневих ДВЗ, а також, виконати оцінку законів підведення і відведення теплоти на основі показника циклів.

#### 4.1 Цикл з постійним складом і масою робочого тіла

Розглянемо замкнутий цикл, що проходить через задану точку  $(p_0, V_0)$  простору стану в координатах  $p, V$ , де  $p$  – тиск,  $V$  – питомий об'єм. На основі першого закону термодинаміки зміна параметрів робочого тіла в процесі його деформації і теплопередачі можна описати диференціальним рівнянням

$$dU = -pdV + dq, \quad (4.1)$$

де  $dU$  – приріст внутрішньої енергії одиниці маси;

$dq$  – елемент теплоти підведеної до одиниці маси робочого тіла.

Враховуючи, що робоче тіло є ідеальним газом з показником  $k$ , і враховуючи, що його внутрішня енергія

$$U = \frac{p \cdot V}{k-1} \quad (4.2)$$

знаходячи диференціал (4.2) і підставляючи вираз для  $dU$  в (4.1), одержимо

$$V \cdot dp = -k \cdot p \cdot dV + (k-1)dq . \quad (4.3)$$

Якщо зв'язати процес з часом (або з кутом обертання колінчастого вала), з виразу (4.3) одержуємо диференційне рівняння робочого процесу в поршневому ДВЗ

$$\frac{dp}{dt} = -k \frac{W}{V} p + \frac{k-1}{V} q , \quad (4.4)$$

де  $W$  – швидкість зміни питомого об'єму, що визначається геометричними параметрами двигуна;

$q$  – інтенсивність підведення теплоти, що визначається процесом згоряння і теплопередачі.

Якщо перейти до відносних координат:

$$\pi = \frac{p}{p_0}; \quad \sigma = \frac{V}{V_0}; \quad \theta = \frac{T}{T_0} , \quad (4.5)$$

де  $T$  – абсолютна температура робочого тіла;

$T_0$  – температура, що відповідає стану  $(p_0, V_0)$

одержимо рівняння стану

$$\pi \cdot \sigma = \theta . \quad (4.6)$$

Підставляючи (4.5) в (4.6), одержуємо диференційне рівняння робочого процесу у відносних координатах

$$\frac{d\pi}{dt} = -k \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \pi + \frac{1}{\sigma} \delta \quad (4.7)$$

де  $\dot{\sigma}$  - швидкість зміни відносного питомого об'єму;

$$\delta = \frac{q(k-1)}{p_0 \cdot V_0} - \text{відносна інтенсивність теплопідводу.}$$

Рівняння робочого процесу (4.7) представляє собою лінійне нестационарне з періодичними коефіцієнтами неоднорідне диференціальне рівняння першого роду. Його рішення при заданих початкових умовах ( $\pi(0)=1$ ,  $\sigma(0)$ ) однозначно визначається заданим законом зміни об'єму  $\sigma(t)$  і законом тепловідведення  $\delta(t)$ . Перетворимо рівняння (4.7) в канонічний вид, для чого введемо нову змінну  $y$

$$\pi(t) = \varphi(t) \cdot y(t) \quad (4.8)$$

де  $\varphi(t)$  - фундаментальне рішення однорідного рівняння

$$\frac{d\pi}{dt} = -k \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \pi \quad (4.9)$$

В рівнянні (4.9) змінні розділяються

$$\pi(t) = C \cdot \sigma(t)^{-k},$$

де  $C$  – довільна постійна.

Таким чином, фундаментальне рішення (4.9) має вигляд

$$\varphi(t) = \sigma^{-k},$$

а нова змінна  $y$  на основі (4.8) має вигляд

$$y = \pi \cdot \sigma^k \quad (4.10)$$

Якщо підставити (4.10) у вихідне рівняння (4.7), одержимо канонічне рівняння процесу у просторі  $(y, \sigma)$

$$\frac{dy}{dt} = \sigma^{k-1} \cdot \delta . \quad (4.11)$$

Перехід до рівняння робочого процесу у формі (4.11) в значній степені спростить процес побудови індикаторної діаграми двигуна. З рівняння (4.11) слідує

$$y(t) = 1 + \int_0^t \sigma^{k-1}(\tau) \cdot \delta(\tau) \cdot d\tau , \quad (4.12)$$

тобто зміна  $\pi$  в робочому процесі знаходиться з рівняння

$$\pi(t) = \sigma^{-k}(t) \left[ 1 + \int_0^t \sigma^{k-1}(\tau) \delta(\tau) d\tau \right] . \quad (4.13)$$

Тиск в кінці стиснення визначається з (4.13) у вигляді

$$\pi = \sigma_{\min}^{-k} ,$$

а тиск при миттєвому підводі теплоти у верхній мертвій точці – у вигляді

$$\pi = \sigma_{\min}^{-k} + \frac{Q}{\sigma_{\min}} , \quad (4.14)$$

де  $Q$  – теплота, що відведена до одиниці маси в циклі і віднесена до початкової енергії робочого тіла.

Нескладно показати, що (4.14) представляє собою граничне значення тиску, що може бути досягнуто в циклі з мінімальним відношенням об'ємів  $\sigma_{\min}$  і розміщеною теплотою  $Q$ .

Тиск в кінці процесу розширення визначається виразом

$$\pi = 1 + Q \cdot \sigma_{\min}^{k-1} .$$

Робота з першого закону термодинаміки

$$l \cdot (t) = \int_0^t \delta(\tau) d\tau - [\theta(\tau) - 1], \quad (4.15)$$

де  $l(t)$  – механічна робота, що виробляється робочим тілом і віднесена до початкової внутрішньої енергії.

Вираз в дужках в (4.15) представляє собою зміну відносної внутрішньої енергії робочого тіла.

Із залежностей (4.6) і (4.13) можна одержати вираз для температури циклу

$$\theta(t) = \sigma^{1-k}(t) \left[ 1 + \int_0^t \sigma^{k-1}(\tau) \delta(\tau) d\tau \right]. \quad (4.16)$$

Якщо вираз (4.16) підставити в (4.15) одержимо залежність для роботи термодинамічного циклу.

$$l(t) = 1 - \sigma^{1-k}(t) + \int_0^t [1 - \sigma^{k-1}(\tau)] \cdot \delta(\tau) d\tau, \quad (4.17)$$

Оскільки циклічний процес характеризується досягненням величини  $\sigma = 1$ , то залежність для роботи на основі (1.17) має вигляд

$$l = \int_0^t [1 - \sigma^{k-1}(\tau)] \cdot \delta(\tau) d\tau, \quad (4.18)$$

а термічний ККД процесу

$$\eta = \int_0^t [1 - \sigma^{k-1}(\tau)] \cdot \bar{\delta}(\tau) d\tau, \quad (4.19)$$

де  $\bar{\delta}(\tau)$  - нормативна інтенсивність теплопроводу,  $\bar{\delta} = \frac{\delta}{Q}$ .

Вираз (4.19) можна представити в більш розповсюдженому вигляді

$$\eta = \int_0^t [1 - \varepsilon^{k-1}(\tau)] \cdot \bar{\delta}(\tau) d\tau, \quad (4.20)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь стиснення.

Залежності (4.13), (4.16) і (4.20), що описують зміну основних параметрів робочого процесу, передбачають інтегрування функцій часу, які, як правило, задаються аналітичними залежностями.

## 4.2 Оптимальний цикл

Основною задачею конструювання двигуна є організація його робочого процесу, що забезпечує максимальне значення ККД при виконанні обмежень на величину робочого циклу, максимальний тиск, температуру і т.д. Порівняння трьох основних теоретичних циклів поршневого ДВЗ показує, що максимальний термічний ККД має цикл Отто.

## Лекція № 5

### 5. Математичне моделювання процесів згоряння ДВЗ

Процес згоряння ДВЗ розглянемо на прикладі двигуна з іскровим запалюванням. Розрахункову схему двозонної моделі можна умовно представити у вигляді, що на рис. 5.1.

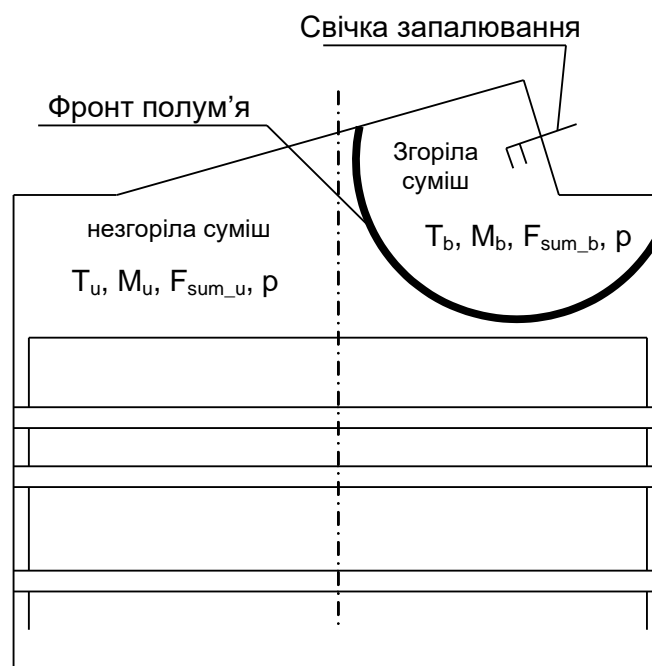


Рисунок 5.1 – Схема двозонної моделі процесу згоряння

Двезонна модель згоряння припускає такі допущення:

1. Об'єм камери згоряння ділиться нескінченно тонким фронтом полум'я на зону суміші, що згоріла і на зону суміші, яка не згоріла;
2. Робоче тіло в обох зонах являється ідеальним газом;
3. Хімічний склад робочого тіла в зонах відрізняється. Тому й відрізняється і його теплофізичні характеристики;
4. Тиск в обох зонах однаковий;



5. В межах кожної зони відсутні градієнти параметрів робочого тіла по координатам.

Виходячи з цих допущень, математична модель процесу згоряння має вигляд:

маса робочого тіла у камері згоряння згідно закону збереження маси незмінна

$$M = M_u + M_B , \quad (5.1)$$

де  $M_u$  – маса суміші, що незгоріла;

$M_B$  – маса суміші, яка згоріла.

Об'єм робочого тіла у камері згоряння

$$V = V_u + V_B , \quad (5.2)$$

де  $V_u$  – об'єм суміші, яка не згоріла,

$V_B$  – об'єм суміші, що згоріла.

Тиск  $p$  і середня термодинамічна температура  $T$  в камері згоряння розраховується за допомогою методики І.І. Вібе.

Оскільки нам відомі маса і тиск суміші в камері згоряння, а також, склад робочої суміші в обох зонах, можна, використовуючи термодинамічні рівняння, визначити температури в кожній зоні.

В зоні де суміш ще не згоріла, температура збільшується за рахунок адіабатного стиснення. Значить, температура суміші в цій зоні

$$T_{u i+1} = T_{u i} \left( \frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{k_u-1}{k_u}} , \quad (5.3)$$

де  $T_u$  – температура суміші, що не згоріла;

$p$  - тиск в камері згоряння;

$k_u$  - показник адіабати стиснення суміші, що не згоріла;

$i$  - порядковий номер елемента в масиві.

Показники адіабати стиснення суміші, що не згоріла

$$k_u = 1 + \frac{R_u}{C_{vu}}, \quad (5.4)$$

де  $R_u$  - характеристична газова стала суміші, що не згоріла;

$C_{vu}$  – масова ізохорна теплоємність суміші, що не згоріла.

Температура суміші, що згоріла визначається згідно рівняння стану ідеального газу

$$p_i \cdot V_{vi} = M_B \cdot R_B \cdot T_{vi}, \quad (5.5)$$

де  $R_B$  – характеристична газова стала суміші, що згоріла;

$T_{vi}$  – температура суміші, що згоріла.

Виходячи з рівняння (5.1), маси сумішей в будь-який момент часу процесу згоряння можна знайти

$$M_B = M \cdot x, \quad (5.6)$$

$$M_u = M(1 - x), \quad (5.7)$$

де  $x$  – доля палива, що згоріла до моменту часу  $\varphi$ .

Згідно методики І.І. Вібе

$$x = 1 - \exp \left[ -6.908 \left( \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right], \quad (5.8)$$

де  $\varphi_0$  – кут початку згоряння;  
 $\varphi_z$  – тривалість згоряння;  
 $m$  – показник згоряння Вібе.

Рівняння (5.5), крім невідомої температури  $T_g$ , містить невідомий об'єм  $V_g$ .  
 Для виключення невідомого об'єму  $V_g$ , можна записати

$$p(V - V_u) = M_B \cdot R_B \cdot T_B. \quad (5.9)$$

або

$$p \cdot V - p \cdot V_u = M_B \cdot R_B \cdot T_B, \quad (5.10)$$

Виходячи з рівняння

$$p \cdot V_u = M_u \cdot R_u \cdot T_u, \quad (5.11)$$

одержимо температуру  $T_g$

$$T_B = \frac{pV - M \cdot R_u \cdot T_u(1 - x)}{x \cdot M \cdot R_B}. \quad (5.12)$$

Проблемною задачею розрахунку процесу згоряння є врахування тепловіддачі в стінки камері згоряння для кожної зони окремо. Це викликано складністю геометричних розрахунків поверхонь теплопередачі в зонах де суміш згоріла і не згоріла. З врахуванням швидкості руху полум'я і застосуванням методів аналітичної геометрії є можливість виконання таких розрахунків. Однак, цей шлях є найскладнішим. Тому доцільно використати більш простий підхід. Згідно закону збереження енергії, загальна кількість теплоти, що передається в стінки буде складати

$$Q_w = Q_{w u} + Q_{w B}, \quad (5.13)$$

де  $Q_{w u}$  - кількість теплоти, що передається в стінки від зони де суміш не згоріла;

$Q_{wB}$  - кількість теплоти, що передається в стінки від зони де суміш згоріла.

Згідно закону Ньютона-Ріхмана:

$$Q_w = \alpha \cdot F_{sum} (T - T_w) \cdot \Delta\tau, \quad (5.14)$$

$$Q_{wu} = \alpha_u \cdot F_{sum u} (T_u - T_{wu}) \cdot \Delta\tau, \quad (5.15)$$

$$Q_{wB} = \alpha_B \cdot F_{sum B} (T_B - T_{wB}) \cdot \Delta\tau, \quad (5.16)$$

де  $\Delta\tau$  - час;

$T_w$  - середня температура всіх поверхонь камери згорання;

$T_{wu}$  - середня температура поверхні камери згорання де суміш не згоріла;

$T_{wB}$  - середня температура всіх поверхонь камери згорання де суміш згоріла;

$F_{sum u}$  - сумарна площа поверхні зони де суміш не згоріла;

$F_{sum B}$  - сумарна площа поверхні зони де суміш згоріла.

Загальна площа  $F_{sum}$  дорівнює

$$F_{sum} = F_{sum u} + F_{sum B} \quad (5.17)$$

Вирішуючи рівняння (5.13), (5.14), (5.15), (5.16) і (5.17) разом одержуємо:

$$F_{sum u} = \frac{F_{sum} [\alpha \cdot (T - T_w) - \alpha_B (T_B - T_{wB})]}{\alpha_u (T_u - T_{wu}) - \alpha_B (T_B - T_{wB})} ; \quad (5.18)$$

$$F_{sum B} = \frac{F_{sum} [\alpha \cdot (T - T_w) - \alpha_u (T_u - T_{wu})]}{\alpha_B (T_B - T_{wB}) - \alpha_u (T_u - T_{wu})} . \quad (5.19)$$

Приведена методика визначення площ дозволяє одержати поверхні теплопередачі кожної зони без використання геометричних побудов.

Для розрахунку впливу дисоціації продуктів згорання на температуру суміші, що згоріла, використовувалась відома методика. Адіабатна (без

теплообміну з навколишнім середовищем) температура горіння суміші відомого складу розраховується у відповідності з першим законом термодинаміки

$$T_B = \frac{N'_u + Q_{\text{фіз}} - Q_{\text{дис}}}{\sum_i (V_i \cdot C_{pi})} , \quad (5.20)$$

де  $N'_u$  - нижча теплота згоряння палива;

$Q_{\text{фіз}}$  - фізична теплота палива і повітря;

$Q_{\text{дис}}$  - кількість теплоти, що поглинається при дисоціації;

$\sum_i (V_i \cdot C_{pi})$  - сума добутків приведених об'ємів і середніх ізобарних об'ємних

теплоємностей компонентів продуктів згоряння при постійному тиску.

Для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі від робочого тіла до стінок камери згоряння, рекомендована формула В. Аннанза

$$\alpha = 0,26 \cdot \lambda \frac{\rho^{0,7} \cdot C_m^{0,7}}{\mu^{0,7} \cdot D^{0,3}} + 2,1 \cdot 10^{-13} (T_{пл}^4 - T_w^4) , \quad (5.21)$$

де  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  – відповідно коефіцієнт теплопровідності , густина і динамічна в'язкість робочого тіла;

$C_m$  – середня швидкість поршня;

$D$  – діаметр циліндра;

$T_{пл}$  – температура полум'я;

$T_w$  – температура стінок циліндра.

## *Лекція № 6*

### **6. Математичне моделювання складного теплообміну в циліндрі ДВЗ**

Складний теплообмін в циліндрі ДВЗ, як сукупність одночасно протікаючі процесів конвективного і хвильового теплопереносів, розраховується за допомогою методу ефективної теплопередачі. Суть методу ефективної теплопередачі полягає у використанні сумарного коефіцієнта теплопередачі, що враховує і конвективний теплообмін, і теплообмін випромінюванням. В ДВЗ основним домінуючим компонентом в складному теплообміні є конвекція. Конвективний теплообмін в циліндрі обумовлений пристінковою турбулентністю. Правомірно рахувати, що теорія пристінкового шару однофазних і двофазних середовищ до аналізу конвективного теплообміну може служити базою для побудови відповідних математичних моделей стосовно до розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні деталей камери згоряння.

Одержання достовірних характеристик теплообміну випромінюванням в циліндрі ДВЗ повинно базуватися на поглибленні знань про структуру випромінювання, умов проходження хвиль через камеру згоряння і їх поглинання стінками. Випромінювачем в циліндрі ДВЗ є низькотемпературна плазма, метастабільні молекули проміжних реакцій згоряння складних вуглеводів палива, розжарені сажові частини, краплі рідкого палива, нагріті газу. Перші чотири компоненти створюють полум'я, яке заповнює тільки частину об'єму камери згоряння і представляє собою тип хімічної системи, в якій відсутня термодинамічна рівновага. Спектр випромінювання полум'я пов'язаний з концентрацією в ньому сажі.

В циліндрі ДВЗ випромінюють теплоту два газу  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ . Для цих газів характерний дискретний спектр випромінювання.

## 6.1. Розрахункові залежності для визначення теплообміну в циліндрі ДВЗ

Кількість теплоти, що передається в стінки деталей камери згоряння визначається згідно закону Ньютона-Ріхмана

$$Q = \alpha_{\Sigma} F (T_{\Gamma} - T_{CT}) \Delta \tau, \quad (6.1)$$

де  $\alpha_{\Sigma} = \alpha_K + \alpha_B$  - сумарний коефіцієнт тепловіддачі

$\alpha_K$  - конвективний коефіцієнт тепловіддачі;

$\alpha_B$  - коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням;

$F = F_n + F_{\Gamma} + F_{\psi}$  - сумарна площа поверхні деталей камери згоряння;

$F_n$  - площа поверхні поршня;

$F_{\Gamma}$  - площа поверхні головки;

$F_{\psi}$  - площа поверхні гільзи циліндра;

$T_{\Gamma}$  - середня термодинамічна температура газів;

$T_{CT}$  - середня температура стінки;

$\Delta \tau$  - час.

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі визначається на основі індикаторної діаграми за допомогою емпіричних залежностей приведених в довідниках з теплопередачі в ДВЗ [1,2]. Ці емпіричні залежності одержані на основі критеріальних рівнянь і експериментальних даних. Наприклад, залежність Нуссельта

$$\alpha_{\Sigma} = 0,99 \sqrt[3]{p_{\Gamma}^2 \cdot T_{\Gamma}} \cdot (1 + 1,24 C_m) + 0,362 \frac{(T_{\Gamma} / 100)^4 - (T_{CT} / 100)^4}{T_{\Gamma} - T_{CT}}, \quad (6.2)$$

де  $p_{\Gamma} = f_1(\varphi)$  - тиск газу;

$T_r = f_2(\varphi)$  - температура газу;

$C_m = \frac{S \cdot n}{30}$  - середня швидкість поршня;

$S$  – хід поршня;

$n$  – частота обертання колінчастого вала двигуна;

$T_{ст}$  – температура стінки.

Перша складова формули (6.2) це конвективна складова сумарного коефіцієнта тепловіддачі, а друга складова випромінювання. Залежність Нусельта рекомендують для тихохідних двигунів. Для швидкохідних двигунів більш доцільно застосувати форму В. Аннанда

$$\alpha_{\Sigma} = 0,26 \cdot \lambda \cdot \frac{\rho^{0,7} \cdot C_m^{0,7}}{\eta^{0,7} \cdot D^{0,3}} + 2,1 \cdot 10^{-13} (T_r^4 - T_{ст}^4), \quad (6.3)$$

де  $\lambda = 0,000361 \cdot T_{cp}^{0,75}$  [Вт/м.к] – теплопровідність пристінкового пару газу при

середній температурі  $T_{cp} = \frac{T_r + T_{ст}}{2}$  ;

$\rho = 3,49 \cdot 10^{-3} \frac{P_r}{T_r}$  [кг/м<sup>3</sup>] – густина робочого тіла;

$\eta = 0,56 \cdot 10^{-6} T_{cp}^{0,62}$  [Па·с] – динамічна в'язкість робочого тіла визначена при температурі  $T_{cp}$  ;

$C_m$  – середня швидкість поршня;

$D$  – діаметр циліндра.

Площа поверхні гільзи циліндра є функцією кута обертання колінчастого вала

$$F_u = \pi \cdot D \cdot \left\{ \Delta + R \left[ (1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right) \right] \right\}, \quad (6.4)$$



де  $R = D/2$  – радіус кривошипа;

$\Delta$  – зазор між головкою циліндра і поршнем;

$\lambda = R/L$  – кінематичний параметр кривошипно-шатунного механізму двигуна;

$L$  – довжина шатуна.

Для визначення часу  $\Delta\tau$  в залежності (6.1) використовують формулу

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{6 \cdot n}, [c],$$

де  $\Delta\varphi$  – кут обертання колінчастого вала, [ $^{\circ}$  п.к.в.];

$n$  – частота обертання колінчастого вала, [1/хв].

## 6.2. Дослідження тепловіддачі від робочого тіла в стінки камери згоряння двигуна MeM3-307

Ефективна потужність двигуна на номінальному режимі  $N_e = 50$  кВт при частоті обертання  $n = 5500$  хв $^{-1}$ . Діаметр циліндра  $D = 75$  мм, хід поршня  $S = 73,5$  мм, довжина шатуна  $L = 118$  мм, ступінь стиснення  $\varepsilon = 9,8$ .

### 6.2.1. Допоміжні розрахунки

Робочий об'єм циліндра

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S = \frac{\pi \cdot 0,075^2}{4} \cdot 0,0735 = 0,324 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Об'єм камери стиснення

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} = \frac{0,324 \cdot 10^{-3}}{9,8 - 1} = 0,0368 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Радіус кривошипа

$$R = \frac{S}{2} = \frac{0,0735}{2} = 0,03675 \text{ м.}$$

Кінематичний параметр

$$\lambda = \frac{R}{L} = \frac{0,3675}{0,118} = 0,31144 .$$

Змінний надпоршневий об'єм циліндра

$$V_{\varphi} = V_c + \frac{\pi D^2}{4} \cdot R \left[ (1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi} \right) \right] .$$

Змінна площа поверхні деталей камери згоряння

$$F_{\varphi} = F_n + F_r + \pi D \left\{ \Delta + R \left[ (1 - \cos \varphi) + \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi} \right) \right] \right\} .$$

Обробка експериментальної індикаторної діаграми дозволила одержати залежності тиску газів  $p_r$  та температуру газів  $T_r$  від кута обертання колінчастого вала (табл.6.1).

Таблиця 6.1.

$\varphi^0$ , п.к.в.	$p_{Г}$ , МПа	$T_{Г}$ , К	$\varphi^0$ , п.к.в.	$p_{Г}$ , МПа	$T_{Г}$ , К	$\varphi^0$ , п.к.в.	$p_{Г}$ , МПа	$T_{Г}$ , К
0	0,0929	1100	240	0,115	389	480	0,528	1773
10	0,0928	1000	250	0,131	410	490	0,456	1691
20	0,0928	950	260	0,156	439	500	0,391	1618
30	0,0928	900	270	0,193	481	510	0,335	1555
40	0,0928	850	280	0,240	554	520	0,286	1502
50	0,0928	760	290	0,298	660	530	0,245	1454
60	0,0928	580	300	0,368	770	540	0,210	1412
70	0,0928	460	310	0,495	909	550	0,180	1355
80	0,0928	350	320	0,700	1073	560	0,155	1322
90	0,0928	293	330	1,093	1301	570	0,137	1293
100	0,0928	293	340	1,820	1596	580	0,127	1268
110	0,0928	294	350	3,351	1909	590	0,123	1243
120	0,0928	295	360	5,990	2195	600	0,123	1223
130	0,0928	297	370	7,650	2483	610	0,123	1204
140	0,0928	300	380	6,181	2706	620	0,123	1189
150	0,0928	303	390	4,320	2750	630	0,123	1174
160	0,0928	307	400	3,000	2777	640	0,123	1162311
170	0,0928	311	410	2,137	2745	650	0,123	1151
180	0,0928	316	420	1,600	2644	660	0,123	1142
190	0,0962	322	430	1,247	2447	670	0,123	1134
200	0,100	329	440	1,000	2270	680	0,123	1128
210	0,104	337	450	0,845	2116	690	0,123	1123
220	0,106	358	460	0,700	1984	700	0,120	1119
230	0,110	372	470	0,610	1871	710	0,110	1110

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі від робочого тіла в стінки камери згоряння за формулою В. Аннанда (табл.6.2).

Таблиця 6.2.

$\varphi^0$ , п.к.в.	$\alpha_{\Sigma}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·к	$\varphi^0$ , п.к.в.	$\alpha_{\Sigma}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·к	$\varphi^0$ , п.к.в.	$\alpha_{\Sigma}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·к	$\varphi^0$ , п.к.в.	$\alpha_{\Sigma}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·к
0	193,7	180	188,2	360	1656,7	540	188,3
10	193,7	190	191,6	370	1877,5	550	171,6
20	193,7	200	195,1	380	1569,4	560	156,1
30	193,7	210	198,4	390	1217,1	570	144,7
40	193,7	220	197,0	400	942,5	580	138,3
50	193,7	230	199,0	410	748,8	500	135,9
60	193,7	240	201,8	420	620,6	600	136,7
70	193,7	250	216,8	430	535,7	610	137,5
80	193,7	260	238,6	440	471,8	620	138,2
90	193,7	270	267,8	450	129,5	630	138,8
100	193,7	280	294,8	460	385,4	640	139,4
110	193,5	290	321,2	470	357,5	650	139,8
120	193,1	300	349,8	480	329,8	660	140,2
130	192,6	310	404,7	490	302,8	670	140,6
140	192,0	320	484,0	500	276,4	680	140,9
150	191,3	330	614,7	510	251,7	650	141,15
160	190,4	340	811,9	520	228,5	700	141,3
170	189,3	350	1163,5	530	207,4	710	141,4

Кількість теплоти, що віддається в стінки камери згоряння

$$Q_{cti} = \alpha_{\Sigma i} \cdot F_{\varphi} (T_{ri} - T_{ct}) \cdot \Delta\tau ,$$

де  $\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{6 \cdot n}$  - часовий крок розрахунку.

Для  $\Delta\varphi = 10^0$  повороту колінчастого валу

$$\Delta\tau = \frac{10}{6 \cdot 5500} = 0,000303 \text{ с.}$$

Сумарна кількість теплоти за один цикл роботи

$$Q_{ст} = \sum_{i=0}^{72} Q_{сти} = 181,9 \text{ Дж.}$$

Внутрішній тепловий баланс двигуна має вигляд

$$Q_{п} = Q_i + Q_{ст} + Q_{в.г.},$$

де  $Q_{п}$  – кількість теплоти, що виділяється під час згоряння палива;

$Q_i$  – індикаторна кількість теплоти;

$Q_{в.г.}$  – кількість теплоти, що відводиться з відпрацьованими газами.

$$Q_{п} = G_{п} \cdot Q_{н} = 2,253 \cdot 10^{-3} \cdot 44000 = 0,9912 \text{ кДж} = 991,2 \text{ Дж.}$$

$$Q_i = p_i \cdot V_h = 1,1638 \cdot 0,3247 \cdot 10^{-3} = 377,9 \text{ Дж.}$$

$$Q_{в.г.} = M_2 \cdot \mu \cdot C_{рм} \cdot T_{в.г.} - M_1 \cdot \mu \cdot C_{рм} \cdot T_0 = 1,0302 \cdot 10^{-3} \cdot 26,03 \cdot 1506 - 1,219 \cdot 10^{-3} \cdot 22,13 \cdot 293 = 0,4314 \text{ кДж} = 431,4 \text{ Дж.}$$

Внутрішній тепловий баланс зведений в табл. 6.3

Таблиця 6.3.

Складові теплового балансу	Значення	Відсоток
Теплота згоряння палива $Q_{п}$ , Дж	991,2	100 %
Теплота, що перетворилась в індикаторну роботу $Q_i$ , Дж	377,9	38 %
Теплота, що відводиться з відпрацьованими газами $Q_{в.г.}$ Дж	431,4	44 %
Теплота, що передається стінкам камери згоряння, $Q_{ст}$ , Дж	181,9	18 %

## Література

1. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Справочное пособие. / А.К.Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов // Л., Машиностроение, 1978, 222 с.
2. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях /Г.Б. Розенблит// М. Машиностроение. 1977. 216 с.

## *Лекція № 7*

7.1. Математичне моделювання процесів теплопровідності в елементах енергетичних систем.

7.2. Математичне моделювання процесів нестационарної періодичної теплопровідності деталей камери згоряння ДВЗ.

### **7.1. Математичне моделювання процесів теплопровідності в елементах енергетичних систем**

В основі моделювання процесу теплопровідності лежить закон Фур'є. Цим законом встановлено, що тепловий потік виникає тільки за наявності температурного градієнта і виражає пряму пропорційність між градієнтом температури і густиною теплового потоку. В аналітичній формі закон Фур'є має вигляд

$$\vec{q} = -\lambda \frac{d\vec{t}}{dn} , \quad (7.1)$$

де  $q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·к);

$\frac{dt}{dn}$  – температурний градієнт, к/м.

Знак мінуса у формулі (7.1) показує, що вектор теплового потоку має напрям протилежний напрямку вектора градієнта.

Кількість теплоти, що передається в процесі теплопровідності крізь поверхню площею  $F$  за час  $\tau$ , визначається за формулою

$$Q = q \cdot F \cdot \tau = -\lambda \frac{dt}{dn} \cdot F \cdot \tau . \quad (7.2)$$

Розподіл температур в твердих тілах описується диференціальним рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (7.3)$$

де  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau$  – час, с;

$x, y, z$  – координати;

$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$  - коефіцієнт теплопровідності,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$c_p$  – ізобарна теплоємність тіла,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

$\rho$  - густина тіла,  $\text{кг}/\text{m}^3$ .

Для моделювання процесів теплопровідності до загального рівняння (7.3) необхідно додати граничні умови які можуть бути:

- першого роду, на поверхні тіла задається температура

$$t_n = t_c, \quad \text{або} \quad t_n = f(x, y, z);$$

- другого роду, коли задається густина теплового потоку

$$\vec{q}_n = -\lambda \frac{\partial \vec{t}}{\partial n}, \quad \text{або} \quad q_n = f(\tau);$$

- третього роду, задається коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  і температура теплоносія  $t_T$

$$q_n = \alpha(t_n - t_T);$$

- четвертого роду:

1) ідеальний контакт

$$t_1 = t_2;$$



$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = \lambda_2 \frac{dt_2}{dx} ;$$

2) неідеальний контакт

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = \frac{1}{R} [t_2 - t_1] ;$$

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} = \lambda_2 \frac{dt_2}{dx} .$$

Рівняння (7.3) описує тримірний нестационарний розподіл температур в тілі. Для одержання однозначного вирішення задачі розподілу температур, до рівняння (7.3) необхідно додати сім граничних умов, шість умов по координатах і одну умову по часу (рис. 7.1).

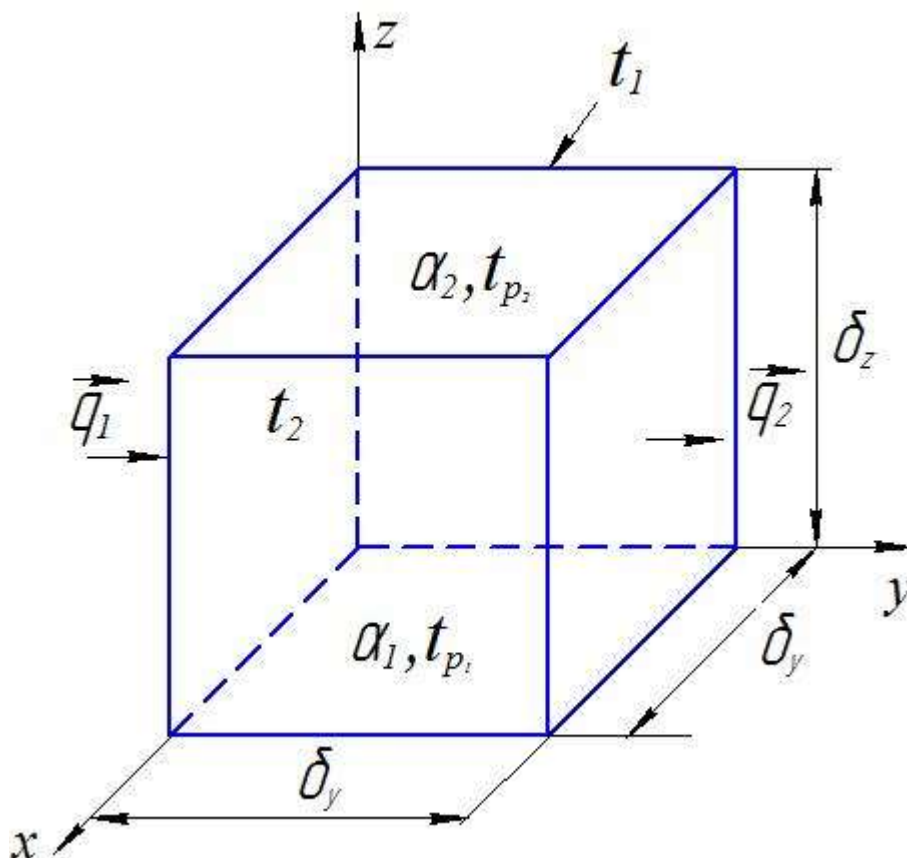


Рисунок 7.1 – Теплопровідність через елементарний об'єм

$$x=0 \quad t_1=t_2 ; \quad (7.4)$$

$$x=\delta_x \quad t=t_2 ; \quad (7.5)$$

$$y=0 \quad q=q_1 ; \quad (7.6)$$

$$y=0 \quad y=\delta_y \quad (7.7)$$

$$z=0 \quad \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha_1 (t_{p1} - t) \quad (7.8)$$

$$z=\delta_z \quad \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha_2 (t - t_{p2}) \quad (7.9)$$

$$\tau=0 \quad t=t_0 \quad (7.10)$$

Систему рівнянь (7.3) – (7.10) називають математичною моделлю теплопровідності тіла. Для проведення дослідження в залежності від методу вирішення системи диференціальних рівнянь одержують розрахункову формулу у випадку аналітичного рішення або змінюють вихідні дані і одержують розподіл температур у випадку застосування чисельних методів.

При моделюванні процесів теплопровідності важливу роль грає форма досліджуваного тіла. У випадку простих форм (плоска стінка, сфера, циліндр) перевагу віддають аналітичним методам вирішення системи диференціальних рівнянь (7.3) – (7.10). Якщо форма тіла складна, то застосовують чисельні методи, наприклад, метод кінцевих елементів, метод кінцевих різниць, метод R-функцій.

## 7.2 Математичне моделювання процесів нестационарної теплопровідності деталей камери згоряння

Нестационарне підвищення теплоти на протязі циклу роботи ДВЗ викликає нестационарні температурні характеристики (максимальну амплітуду, глибину проникнення, максимальну швидкість зміни) на поверхні деталей камери згоряння.

Температурні коливання описуються такою системою рівнянь:

$$a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} ; \quad (7.11)$$

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} - \frac{\alpha(\tau)}{\lambda} [t(0, \tau) - t_r(\tau)] = 0 ; \quad (7.12)$$

$$t(\infty, \tau) = t_0 ; \quad \frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 ; \quad (7.13)$$

$$t(x, 0) = t_0 , \quad (7.14)$$

де  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  - коефіцієнт температуропровідності матеріалу деталі КЗ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$\rho$  – густина матеріалу;

$c$  – теплоємність матеріалу;

$x$  – координати;

$\tau$  – час;

$\alpha(\tau)$  - коефіцієнт тепловіддачі від робочого тіла до поверхні деталі;

$t_r(\tau)$  - температура робочого тіла.

Величина  $\alpha(\tau)$  та  $t_r(\tau)$  визначаються з індикаторних діаграм ДВЗ. Для спрощення вирішення системи (7.11) – (7.14) зробимо заміну  $T = t - t_0$  Тоді:

$$a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} ; \quad (7.15)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\alpha(\tau)}{\lambda} [t_0 + T(0, \tau) - t_r(\tau)] = 0 \quad (7.16)$$

$$T(\infty, \tau) = 0 ; \quad \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 ; \quad (7.17)$$

$$T(x, 0) = 0 . \quad (7.18)$$

Якщо запровадити перетворення по Лапласу до рівняння (7.15), то одержимо рівняння в повних похідних

$$\frac{s}{a} \cdot T_L(x, s) = T_L''(x, s) , \quad (7.19)$$

де  $s$  – комплексна величина.

Рішенням рівняння (7.19) є функція

$$T_L(x, s) = A_{\text{exp}} \left( \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x \right) + B_{\text{exp}} \left( -\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x \right) . \quad (7.20)$$

Умови (7.16) та (7.17) після перетворення по Лапласу мають вигляд:

$$\frac{\partial T_L \cdot (0,5)}{\partial x} - \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\tau)}{\lambda} \cdot T(0,\tau) \cdot e^{-s\tau} \cdot d\tau + \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\tau)}{\lambda} [t_r(\tau) - t_0] \cdot e^{-s\tau} \cdot d\tau = 0 ; \quad (7.21)$$

$$T_L(\infty, s) = 0; \quad \frac{\partial T_L \cdot (\infty, s)}{\partial x} = 0 . \quad (7.22)$$

З умови (7.22) слідує, що  $A = 0$ .

Якщо рішення (7.20) задовольнити умові (7.21) одержимо

$$-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot B_{\text{exp}} \left( -\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot 0 \right) - F_1(s) + F_2(s) = 0 ,$$

$$\text{де } F_1(s) = \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\tau)}{\lambda} \cdot T(0,\tau) e^{-s\tau} d\tau ;$$

$$F_2(s) = \int_0^{\infty} \frac{\alpha(\tau)}{\lambda} \cdot [t_r \cdot (\tau) - t_0] \cdot e^{-s\tau} \cdot d\tau ,$$

звідки

$$B = \frac{F_2(s)}{\sqrt{\frac{s}{a}}} - \frac{F_1(s)}{\sqrt{\frac{s}{a}}} . \quad (7.23)$$

Якщо значення  $B$  з (7.23) підставити в вираз (7.20) при  $A = 0$ , одержимо вирішення системи (7.15) – (7.18) для зображення

$$T_L(x, s) = \frac{F_2(s) \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a}}x\right)}{\sqrt{\frac{s}{a}}} - \frac{F_1(s) \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{a}}x\right)}{\sqrt{\frac{s}{a}}}. \quad (7.24)$$

Застосовуючи теорему про добуток зображень до (7.24), одержимо рішення системи рівнянь (7.15) – (7.18) для оригінала у вигляді

$$T(x, \tau) = f(x, \tau) + \lambda_1 \int_0^\tau K(x, \tau, \nu) \cdot T(0, \nu) \cdot d\nu, \quad (7.25)$$

де  $f(x, \tau) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \int_0^\tau g(x, \tau - \nu) \cdot \frac{\alpha(\nu)}{\lambda} [t_r(\nu) - t_0] d\nu$  ;

$$g(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) ;$$

$$K(x, \tau, \nu) = g(x\tau - \nu) \cdot \frac{\alpha(\nu)}{\lambda} ;$$

$$\lambda_1 = -\sqrt{\frac{a}{\pi}} ;$$

$\nu$  – будь-яке позитивне число.

В правій частині рівняння (7.25) під знаком інтеграла записана невідома функція  $T(0, \tau)$  , для якої при  $x = 0$  одержуємо інтегральне рівняння Вольтера другого роду.

$$T(0, \tau) = f(0, \tau) + \lambda_1 \int_0^\tau K(0, \tau, \nu) \cdot T(0, \nu) d\nu . \quad (7.26)$$

Рішення рівняння (7.26) можна знайти у вигляді степеневого ряду по  $\lambda_1$

$$T(0, \tau) = T_0(\tau) + \lambda_1 T_1(\tau) + \dots + \lambda_1^n \cdot T_n(\tau) = \sum_{n=0}^n \lambda_1^n \cdot T_n(\tau) , \quad (7.27)$$

де  $n \rightarrow \infty$ .

Якщо підставити (7.27) в (7.26) одержимо

$$\sum_{n=0}^{\infty} \lambda_1^n \cdot T_n(\tau) = f(0, \tau) + \lambda_1 \int_0^\tau K(0, \tau, \nu) \cdot \sum_{n=0}^n \lambda_1^n \cdot T_n(\tau, \nu) d\nu .$$

Прирівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях  $\lambda_1$ , одержимо

$$\left. \begin{aligned} T_0(\tau) &= f(0, \tau); \\ T_1(\tau) &= \int_0^\tau K(0, \tau, \nu) \cdot f(0, \nu) d\nu; \\ T_2(\tau) &= \int_0^\tau K(0, \tau, \nu) d\nu \int_0^\nu K(0, \nu, \nu_1) f(0, \nu_1) d\nu_1 \\ &\dots \\ &\dots \\ T_n(\tau) &= \int_0^\tau K(0, \tau, \nu) d\nu \cdot \int_0^\nu K(0, \nu, \nu_1) d\nu_1 \cdot \int_0^{\nu_1} K(0, \nu_1, \nu_2) d\nu_2 \times \\ &\times \int_0^{\nu_{n-2}} K(0, \nu_{n-2}, \nu_{n-1}) \cdot f(0, \nu_{n-1}) d\nu_{n-1}. \end{aligned} \right\} \quad (7.28)$$

Якщо підставити (7.28) в (7.27), одержимо

$$T(0, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_1^n \int_0^{\tau} K(0, \tau, v) dv \cdot \int_0^v K(0, v, v_1) dv_1 \cdot \int_0^{v_1} K(0, v_1, v_2) dv_2 \times \\ \times \int_0^{v_{n-2}} K(0, v_{n-2}, v_{n-1}) \cdot f(0, v_{n-1}) dv_{n-1}. \quad (7.29)$$

Ряд (7.29) рівномірно сходиться, оскільки мажорантним для нього є ряд

$$Q \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R^n \cdot \lambda_1^n}{n!} \cdot \tau^n \quad (Q, R = const),$$

сходимость якого очевидна.

Рішення системи (7.11) – (7.14) одержуємо у вигляді

$$t(x, \tau) = t_0 + f(x, \tau) + \sum_{n=1}^{\infty} - \left( \sqrt{\frac{a}{\pi}} \right)^{n+1} \cdot \int_0^{\tau} K(x, \tau, v) dv \times \\ \times \int_0^v K(0, v, v_1) dv_1 \times \dots \times \int_0^{v_{n-1}} K(0, v_{n-1}, v_n) \cdot f(0, v_n) dv_n. \quad (7.30)$$

Рішення (7.30) представляє собою знакозмінний ряд Лейбница, що швидко сходиться і є зручним для числових розрахунків. У випадку складних залежностей  $\alpha(\tau)$  та  $t_r(\tau)$  зручно реалізувати рішення (7.30) за допомогою ком'ютера.



## Лекція № 8

### 8. Математична модель системи автоматичного регулювання дизеля з акумуляторною паливною системою

Дизель під час роботи, одержуючи навантаження, або зміну навантажень, повинен розвивати необхідну потужність або змінювати її. Для виконання цієї задачі паливна апаратура дизеля оснащена регулятором частоти обертання колінчастого вала. паливна апаратура та регулятор забезпечує дозування циклової подачі палива у відповідності з навантаженням двигуна. Це забезпечує стійкість роботи двигуна як на стаціонарних так і на нестаціонарних режимах його роботи.

Швидкий розвиток електроніки і мікропроцесорної техніки обумовило появу електрогідроуправляємих систем впорскування палива. До них відносяться акумуляторні системи («Common Rail»), системи з індивідуальними насосними секціями (UPS) і насос форсунки (UIS) з електромагнітними управляючими клапанами. Функціонування таких систем забезпечується спеціальними алгоритмами, які реалізовані в електронних блоках управління (ЕБУ) двигуна. Ці алгоритми включають в себе електронний регулятор, що забезпечує потрібну роботу двигуна не тільки на ustalених але й на перехідних режимах. У відношенні електронного регулятора, його синтез заключається в підборці значень диференційного  $k_d$ , пропорційного  $k_n$  і інтегрального  $k_u$  коефіцієнтів при заданих конструктивних параметрах системи автоматичного регулювання (САР) з виконанням обмежуючих умов по:

- 1) стійкості;
- 2) коливальності;
- 3) швидкодії.

Значно пришвидшується вирішення задачі розробки схеми і вибір параметрів САР створенням математичної моделі і використанням її для оптимізації параметрів електронного регулятора.

Так необхідною і достатньою умовою стійкості САР є від'ємне значення всіх корнів його характеристичного полінома загального диференційного рівняння. Швидкодія САР визначається максимальним значенням від'ємної дійсної частини цих корнів. Такий корінь називається домінуючим. Коливальність визначається максимальним значенням відношення умовної і дійсної частин корнів характеристичного полінома.

### 8.1. Система диференційних рівнянь

Математична модель САР представляє собою систему диференційних рівнянь, які описують поведінку об'єкта регулювання при зовнішніх діях. Функціональна схема такої системи автоматичного регулювання приведена на рис. 8.1.

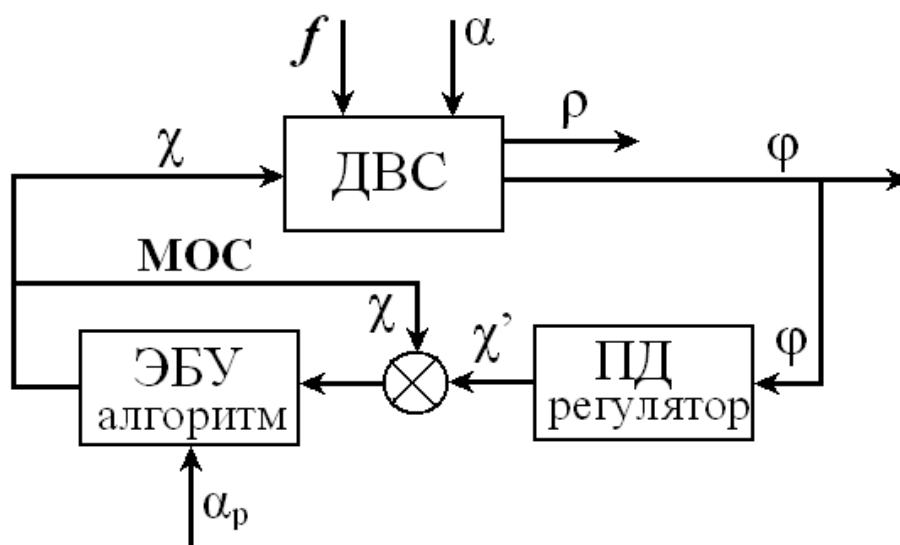


Рисунок 8.1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання дизеля з акумуляторною системою паливоподачі

Динамічні процеси описуються такою системою диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned}
 T_d \frac{d\varphi}{dt} &= \chi - k_d \cdot \varphi + \theta_\rho \cdot \rho - \theta_n \cdot \alpha; \\
 T_{AK} \frac{d\rho}{dt} &= k_\varphi \cdot \varphi - \chi - k_\rho \cdot \rho - \theta_f \cdot f; \\
 T_d \frac{d\chi'}{dt} &= -(k_n \cdot T_d + k_d) \frac{d\varphi}{dt} - k_n \cdot \varphi - \chi'; \\
 T_d \frac{d\chi}{dt} &= \chi' + \alpha_\rho.
 \end{aligned} \right\} (8.1)$$

В рівняння (8.1) системи входять такі величини:

$T_d$  – постійна часу поршневої частини двигуна;

$k_d$  – коефіцієнт самовирівнювання поршневої частини;

$\theta_\rho$  – коефіцієнт підсилення по навантаженню;

$T_{AK}$  – постійна часу акумулятора палива;

$k_\varphi$  – коефіцієнт підсилення по кутовій швидкості колінчастого вала;

$k_\rho$  – коефіцієнт самовирівнювання акумулятора палива;

$\theta_f$  – коефіцієнт підсилення по сигналу на клапан акумулятора палива;

$\varphi$  – відносна зміна кутової швидкості колінчастого вала;

$\rho$  – відносна зміна тиску палива в акумуляторі;

$\alpha$  – відносна зміна навантаження на двигун;

$\alpha_\rho$  – відносна зміна управляючої дії;

$\chi$  – відносна зміна протяжності сигналу на електромагніт форсунки (величина циклової подачі палива);

$T_d$  – час ЕБУ (затримка в обробці каналу).

## 8.2. Модель у просторі станів

Перетворемо систему диференційних рівнянь (8.1) в нормалізований вигляд шляхом підстановки в праву частину третього рівняння величину  $\dot{\varphi}$  з першого рівняння:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{\varphi} &= -\frac{k_d}{T_d} \cdot \varphi + \frac{\theta_\rho}{T_d} \cdot \rho + \frac{1}{T_d} \cdot \chi - \frac{\theta_n}{T_d} \alpha; \\
 \dot{\rho} &= \frac{k_\varphi}{T_{AK}} \cdot \varphi - \frac{k_\rho}{T_{AK}} \cdot \rho - \frac{1}{T_{AK}} \cdot \chi - \frac{\theta_f}{T_{AK}} \cdot f; \\
 \dot{\chi}' &= \left[ \frac{k_d}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) - \frac{k_n}{T_d} \right] \cdot \varphi - \frac{\theta_\rho}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) \cdot \rho - \\
 &\quad - \frac{1}{T_d} \cdot \chi' - \frac{1}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) \cdot \chi + \frac{\theta_n}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) \cdot \alpha; \\
 \dot{\chi} &= \frac{1}{T_d} \cdot \chi' + \frac{1}{T_d} \cdot \alpha_\rho.
 \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

Система рівнянь (8.2) може бути представлена у вигляді моделі у просторі станів:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \\
 y(t) &= C \cdot x(t) + D \cdot u(t),
 \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

де  $A$  – власна матриця системи;

$B$  – матриця управління;

$C$  – матриця виходу;

$D$  – матриця прямого зв'язку;

$x(t)$  – вектор стану;

$u(t)$  – вектор входу (управління);

$y(t)$  – вектор виходу.

Перше рівняння моделі (8.3) називається рівнянням стану, друге – рівнянням виходу. Для системи диференційних рівнянь (8.2) матриці  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $x(t)$ ,  $u(t)$ ,  $y(t)$  мають вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-k_d}{T_d} & \frac{\theta_\rho}{T_d} & 0 & \frac{1}{T_d} \\ \frac{k_\varphi}{T_{AK}} & \frac{-k_\rho}{T_{AK}} & 0 & \frac{-1}{T_{AK}} \\ \frac{k_d}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) - \frac{k_n}{T_d} & \frac{-\theta_\rho}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) & \frac{-1}{T_d} & \frac{-1}{T_d} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_d} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{-\theta_H}{T_A} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\theta_f}{T_{AK}} & 0 \\ \frac{\theta_H}{T_A} \left( k_n + \frac{k_d}{T_d} \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_d} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} \varphi \\ \rho \\ \chi' \\ \chi \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} \alpha \\ f \\ \alpha_\rho \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \varphi \\ \rho \end{bmatrix}; \quad D = 0.$$

Математична модель у формі (8.3) дозволяє досліджувати системи різної природи відомими методами, незалежно від суті змінних станів.

Якщо рівняння вирішуються чисельним інтегруванням, то знаходять похідну, тобто швидкість зміни вектора стану  $x(t)$  в будь-який час, тоді його значення в час  $t + \Delta t$  визначають за формулою

$$x(t + \Delta t) \approx x(t) + \dot{x}(t)\Delta t = x(t) + [A \cdot x(t) + B \cdot u(t)] \cdot \Delta t.$$

Знаючи стан системи  $x(t + \Delta t)$  і сигнал управління  $u(t + \Delta t)$  можна знайти вихід в той же момент часу

$$y(t + \Delta t) = C \cdot x(t + \Delta t) + D \cdot u(t + \Delta t).$$

Таким чином, можна приблизно розрахувати вихід системи для будь-якого моменту часу. Точність розрахунку буде тим більша, чим крок інтегрування буде меншим, однак об'єм розрахунків при цьому збільшується.

Постійність матриць  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$  не є обов'язковою умовою. У просторі станів можна працювати з нелінійними і нестационарними системами.

## Лекція № 9

### 9. Дослідження системи автоматичного регулювання дизеля 1ДТА

Дизель 1ДТА оснащений акумуляторною паливною системою має такі технічні характеристики:  $D = 88$  мм,  $S = 82$  мм,  $\varepsilon = 19$ ,  $N_e = 20$  кВт,  $n = 4200$  хв<sup>-1</sup>.

В системі автоматичного регулювання час затримки обробки сигналу ЕБУ  $T_d$  є час одного робочого циклу чотиритактного двигуна

$$T_d = \frac{120}{n}, \quad (9.1)$$

де  $n$  – частота обертання колінчастого валу двигуна.

Для поля робочих режимів двигуна від  $n_1 = 1000$  1/хв. до  $n_2 = 4000$  1/хв. величину можна взяти середню інтегральну

$$T_{d_{cp}} = \frac{\int_{n_1}^{n_2} \frac{120}{n} \cdot d_n}{n_2 - n_1} = 120 \frac{\ln n_2 - \ln n_1}{n_2 - n_1} = 120 \frac{\ln(4000) - \ln(1000)}{4000 - 1000} \approx 0,055c. \quad (9.2)$$

Значення частоти обертання

$$n = n_0 + \varphi \cdot n_0 \quad (9.3)$$

є величиною змінною в перехідному процесі, а значить змінним буде  $T_d$

$$T_d = \frac{120}{n} = \frac{120}{n_0 + \varphi \cdot n_0} = \frac{120}{n_0} \cdot \frac{1}{1 + \varphi} = \frac{T_{d_{cp}}}{1 + \varphi} = f(\varphi). \quad (9.4)$$



Оскільки коефіцієнт рівнянь математичної моделі САР залежить від параметра стану  $\varphi$ , то модель буде нелінійною.

Числові значення коефіцієнтів і часових констант двигуна 1ДТА такі:  $T_D = 3,7$  с,  $k_D = 0,1$ ,  $\theta_p = 0,4$ ,  $T_{AK} = 1$  с,  $k_\varphi = 5$ ,  $k_\rho = 19$ ,  $\theta_f = -10$ ,  $\theta_n = 1,5$ . Ці дані дозволили записати власну матрицю і матрицю управління:

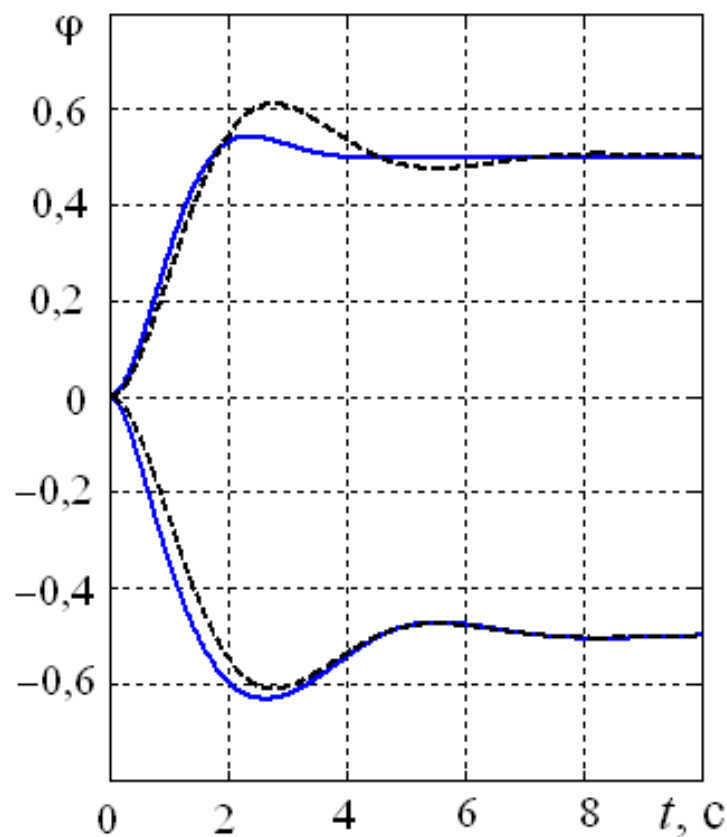
$$A = \begin{bmatrix} -0,027 & 0,081 & 0 & 0,27 \\ 0 & -19 & 0 & -1 \\ \frac{k_n}{37} + \frac{\frac{k_d}{37} - k_n}{T_d(\varphi)} & -\frac{k_n + \frac{k_d}{T_d(\varphi)}}{12,3} & -\frac{1}{T_d} & -\frac{k_n + \frac{k_d}{T_d(\varphi)}}{3,7} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_d} & 0 \end{bmatrix}; \quad (9.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0,41 \\ 10 \\ \frac{k_n + \frac{k_d}{T_d(\varphi)}}{2,44} \\ \frac{1}{T_d(\varphi)} \end{bmatrix}. \quad (9.6)$$

Вирішення системи рівнянь (8.3) (Лекція №8) з врахуванням матриць (9.5) і (9.6) дозволило одержати результати перехідних процесів. При цьому значення коефіцієнтів  $k_d = 0,28$  і  $k_n = 0,4$  прийняті довільно, а крок інтегрування  $\Delta t = 0,01$  с.

Результати розрахунку для різних значень вектора управління (входу) приведені на рис. 9.1. На цих же рисунках приведені результати аналогічних розрахунків, але виконаних шляхом аналітичного рішення системи рівнянь.

Аналізи одержаних результатів показують, що не лінійність системи, що викликана залежністю  $T_d(\varphi)$  приводить до порушенню симетрії динамічних характеристик при протилежних значень входу ( $\pm 1$ ).



----- аналітичне рішення; \_\_\_\_\_ чисельне рішення

Рисунок 9.1. – Зміна кутової швидкості колінчастого вала при різних векторах входу:

$$a - u(t) = \begin{bmatrix} \pm 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \delta - u(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 20 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad b - u(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 0,2 \end{bmatrix};$$

Розрахунки дозволяють зробити висновок про те, що при збільшенні значення  $T_d$  коливальність системи зростає. Крім того, математичну модель можна успішно застосовувати для створення (синтезу) адаптивних алгоритмів електронних регуляторів.

## *Лекція № 10*

### **10. Математичне моделювання акумуляторної паливної апаратури з електронним керуванням**

Проблема поліпшення паливної економічності та екологічних показників вимагає впровадження нових рішень, спрямованих на удосконалення паливної апаратури. Організація ефективного сумішоутворення і згоряння в циліндрі дизеля з безпосереднім упорскуванням можлива у випадках:

- підвищення тиску упорскування до 100 МПа і вище із скороченням часу паливоподачі;
- забезпечення багатостадійного упорскування;
- зміни моменту початку паливоподачі в залежності від режиму роботи дизеля;
- підтримка для кожного режиму роботи дизеля оптимального тиску упорскування палива.

Такі вимоги до організації сумішоутворення і згоряння може забезпечити акумуляторна система або насос-форсунка з електронною системою керування. Акумуляторні паливні системи мають більш широкі можливості керування паливоподачею, бо створення високого тиску і забезпечення заданої характеристики розділені між елементами системи.

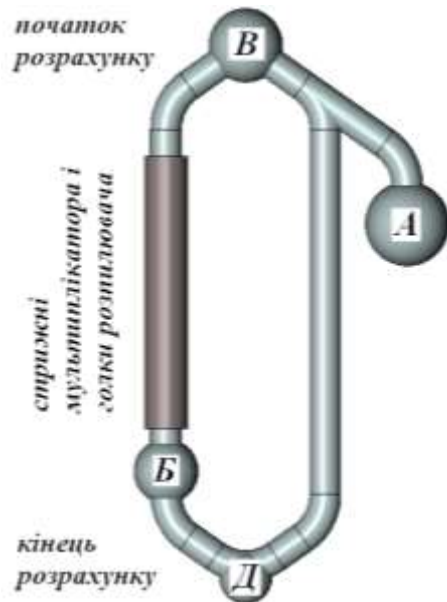
Математичне моделювання акумуляторної паливної апаратури з електронним керуванням дозволяє швидко і ефективно вибирати параметри і вдосконалювати їх у випадку існуючої системи.

#### **10.1. Система диференційних рівнянь**

На рис. 10.1 приведена розрахункова схема акумуляторної паливної апаратури. Головною особливістю схеми є шляхи поширення імпульсу тиску

між порожнинами. Від порожнини керування **В** імпульс тиску передається до порожнини розпилювача **Б** на двох каналах:

- у вигляді хвилі потужності деформації по мультиплікатору і голці;
- по лінії високого тиску паливного каналу.



*А* – порожнина гідроаккумулятора; *Б* – надголкова порожнина розпилювача;  
*В* – порожнина керування; *Д* – умовна порожнина.

Рисунок 10. 1 – Розрахункова схема акумуляторної паливної апаратури

У зв'язку з різною швидкістю вони проходять до розпилювача в різний час. Іншою важливою особливістю схеми є те, що керування процесом здійснюється не у порожнині, де стискається паливо, а в проміжній порожнині керування **В**.

Стрижнями мультиплікатора і голки імпульс тиску передається у вигляді хвилі потужної деформації. Для опису цього процесу, а також хвильового процесу в паливних каналах високого тиску використовується відоме телеграфне рівняння

$$\frac{\partial^2 C_i}{\partial t^2} - a_i^2 \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} + K_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = 0 \quad , \quad (10.1)$$

де  $C_i$  – швидкість руху палива ( $C_n$ ) або елемента конструкції ( $C_c$ );

$t$  – час;

$a_i$  – швидкість поширення звуку у паливі ( $a_n$ ) або сталевим стрижнем ( $a_c$ );

$x$  – координата перерізу;

$K$  – фактор гідравлічного опору ( $K_n$ ) або коефіцієнт загасання хвиль ( $K_c$ ).

Процес поширення хвилі пружної деформації стрижнями розраховується з урахуванням загасання хвиль внаслідок, головним чином, зовнішнього тертя, що враховане емпіричним коефіцієнтом  $K_c$ , який, як і швидкість поширення звуку по сталевому стрижню  $a_c$ , має постійне значення. В такому разі для розв'язання рівняння (10.1) можна використати наближене рішення, що приводить до появи у хвилях д'Аламбера загасаючих множників. Аналогічний підхід застосовується у методиці гідродинамічного розрахунку, що запропонована проф. Астаховим І.В.

Задача про течію палива у лінії високого тиску розв'язується з урахуванням місцевої швидкості  $a_T$  звуку, що є необхідним атрибутом сучасних методів розрахунку та початковим і граничним умов: до подачі сигналу керування швидкість руху палива у всіх перерізах дорівнює нулю; тиск палива в порожнинах А, Б, В дорівнює  $p_{ак}$ .

Граничні умови описуються диференціальним рівнянням суцільності потоку в порожнинах високого тиску та рівнянням руху. Узагальнене рівняння суцільності потоку з урахуванням стикання палива має вигляд

$$\beta(p_i, T) \cdot V_i \cdot \frac{dp_i}{dt} = Q_i^{BX} - Q_i^{BIX} - Q_i^{YT} - \frac{dV_i}{dt}, \quad (10.2)$$

де  $\beta(p_i, T)$  - коефіцієнт стиснення палива, що змінюється в залежності від тиску у

$i$ -тій порожнині  $p_i$  і температури палива  $T$ ;

$V_i$  – об'єм  $i$ -тої порожнини;

$Q_i^{BX}, Q_i^{BIX}$  - витрати палива на вході і виході з порожнини;

$Q_i^{YT}$  - витоки палива по прецизійних зазорах.

При складанні рівнянь руху мультиплікатор, голка, клапан керування розглядається як деформовані стрижні із розподіленими параметрами, що мають з торців по дві зосереджені маси – конуси мультиплікатора і голки або сфери клапана і направляючу. У такому разі для зосередження мас буде справедливим рівняння руху у вигляді

$$m_i \cdot \frac{d^2 \cdot h_i}{dt^2} = \pm q_1^i(t) \pm f_i \cdot p \quad (10.3)$$

де  $m_i$  – маса елемента;

$h_i$  – переміщення елемента;

$q_1^i(t)$  – реакція стрижня, що визначається за рівнянням, яке отримане при узагальненні відомої теорії коливань прямих стрижнів, наприклад

$$q_1^i(t) = z_c^i \left\{ \begin{array}{l} h_{0i} + 0,5 \Delta h_i(t) + \sum_{j=1}^{t/T_{cm}} df^j \cdot \Delta h_1(t - j \cdot T_c) - 0,5(1 + df) \times \\ \times \sum_{j=1}^{t/T_{cm} - 0,5} df^j \cdot \Delta h_2(t - (j + 0,5) \cdot T_c) \end{array} \right\} \quad (10.4)$$

де  $f$ ,  $z_c^i$ ,  $h_{0i}$  – площа поперечного перерізу, коефіцієнт жорсткості та попередня деформація стрижня;

$\Delta h_i(t)$  – умовні переміщення зосереджених мас

$$\Delta h_i(t) = T_c \cdot \dot{h}_i(t) + 2 \left[ \frac{1 - df}{1 + df} \right] \cdot h_i(t) \quad (10.5)$$

де  $df = 0,9 \dots 0,97$  – декремент загасання;

$h_i(t)$  – переміщення нижнього або верхнього торців стрижня;

$T_c$  – основний період коливань стрижня,

$$T_c = 2\sqrt{\frac{m_c^i}{z_c^i}};$$

$m_c^i$  - маса стрижня.

У математичній моделі (10.1) – (10.5) описані основні процеси, що відбуваються у порожнинах низького тиску електрогідравлічної форсунки. А саме процеси витікання палива в малих зазорах з порожнини до порожнини, а також динаміка клапана, опори, та їх пружин. Для підвищення точності визначення тривалості та початку упорскування, величини циклової подачі необхідно враховувати такі явища:

- зіткнення деталей електрогідравлічної форсунки;
- перетікання палива в зазорах між опорами і елементами, що рухаються;
- ефект поєднаних мас;
- вплив довжини трубопроводу і мультиплікатора;
- вплив прохідних перетинів жиклерів камери керування;
- вплив тиску в акумуляторі та сили попередньої деформації пружини клапана;
- вплив стисливості палива і деформації елементів форсунки.



## РОЗДІЛ II. ЕМПІРИЧНІ НАУКОВІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

### *Лекція 11*

- 11.1. Емпіричні знання.
- 11.2. Спостереження.
- 11.3. Опис, як процес закріплення інформації і її передачі.
- 11.4. Вимірювання.
- 11.5. Експеримент.

#### **11.1. Емпіричні знання**

Під емпіричними знаннями розуміють знання, що накопичується в ході розвитку людської практики. В сучасній методології науки емпіричне дослідження розуміють більш вузько, як певний етап одержання наукового знання, яке одержують на основі цілеспрямованого спостереження і експерименту.

Головною метою емпіричного дослідження є одержання даних про спостереження і формування нових фактів, на основі яких будується емпіричний базис наукового знання і розвивається система теоретичних досліджень. Таким чином, емпіричне дослідження здійснюється на базі практичного оперування з об'єктом і викликає безпосереднє спостереження і первинну логічну обробку цього спостереження. В результаті всіх цих процедур з'являються наукові факти.

Різні дані одержані на першому етапі емпіричного дослідження самі по собі не являються фактами науки. В даних можуть бути помилки, які пов'язані з некоректною постановою дослідів, показаннями приладів, відхиленнями в роботі органів людини. Для того, щоб результати таких спостережень одержали статус наукових фактів, необхідно їх очистити від різного роду випадкових і суб'єктивних помилок.

## 11.2. Спостереження

Спостереження – це цілеспрямоване сприймання явищ об'єктивної діяльності, в процесі якого одержують знання про зовнішню сторону властивостей і відношення об'єкта, що вивчається. Наукове спостереження відрізняється від звичайного погляду тим, що спостереження обумовлено науковою ідеєю, яка вироблена на стадії емпіричного дослідження.

При науковому спостереженні застосовують прилади, які дозволяють вивчати властивості об'єкта.

В методології наукового пізнання в залежності від того, що спостерігається і за допомогою яких засобів ведеться спостереження, виділяють чотири його різновиди:

- 1) пряме спостереження;
- 2) непряме спостереження;
- 3) безпосереднє спостереження;
- 4) спостереження за допомогою приладів.

Як правило, в наукових дослідженнях різновиди спостереження не проявляються в чистому вигляді, а використовуються в комбінації один з одним.

## 11.3. Опис, як процес закріплення інформації і її передачі

Емпіричний опис розглядається як завершальний етап спостереження. На цій стадії дослідження ще не ставиться задача про глибоке проникнення в сутність питання (явища) і розкриття його внутрішньої природи. Дослідник прагне як можна подрібніше зафіксувати переважно зовнішні сторони об'єкта, що вивчається.

Опис є необхідним елементом в структурі наукового дослідження. Однак з розвитком науки характер цього елемента змінюється. Об'єм звичайного опису скорочується і його місце займає більш конкретний і суворий опис. Він ділиться на основні два види: якісний і кількісний. Найбільш часто спочатку з'являється

якісний опис, а далі – кількісний опис. Кількісний опис розглядають як фіксацію даних вимірювання. Сучасний науковий опис спирається на математичний апарат і обов'язково включає в себе операцію вимірювання.

#### 11.4. Вимірювання

Вимірювання – це пізнавальна операція в результаті якої одержують чисельне значення величин, що вимірюється. Вимірювання доповнює якісні методи дослідження природних явищ точними кількісними методами. В основі операції вимірювання лежить порівняння об'єктів по конкретним властивостям, характеристикам, признакам. Через вимірювання здійснюється перехід від спостереження в досліді до математичної абстракції і назад. За допомогою одиниць вимірювання з'являється можливість точно виміряти величини, виражаючи відношення через відношення чисел. Враховуючи, що багато величин пов'язані між собою, вдається на основі знань одних величин непрямим шляхом визначити інші.

Кількісні знання величини, що досліджується, можуть бути одержані як безпосередньо за допомогою прямого вимірювання, так і непрямого, шляхом розрахунку.

Пряме вимірювання це безпосереднє порівняння з еталоном. Еталон – це річ, що забезпечує збереження і повторювання виділеної властивості.

Еталон є основою для введення одиниць вимірювання (наприклад, еталон довжини в Парижській палаті мір і ваги одночасно є мірою довжини і дає її одиницю 1 м.).

В процесі розвитку прямих вимірювань створюють вимірювальні прилади, які дозволяють через ряд кроків зрівняти величину з еталоном. На базі прямого вимірювання розвивається непряме вимірювання, сутність якого закладається в тому, що воно дозволяє одержати значення величини, що вимірюється на основі математичної залежності не порівнюючи з еталоном. Таким чином наука одержує чисельні значення величин в умовах, коли процес прямого вимірювання дуже

складний, а також, коли пряме вимірювання неможливе. На відміну від прямого вимірювання непряме вимірювання не є емпіричною процедурою, а представляє перехід від емпіричного дослідження до теоретичного.

Непряме і пряме вимірювання взаємодіють між собою в процесі розвитку науки, уточнюють і перевіряють один одного. Точність прямих вимірювань зростає за допомогою поправок які виносяться за допомогою застосування непрямих вимірювань. В свою чергу складення нових рівнянь і проведення складних вимірювань базується на прямих вимірюваннях. З кожним новим етапом розвитку науки вдосконалюються прилади і способи вимірювання, створюються нові методи розрахунку, нова вимірювальна апаратура і еталони. Стає можливим вивчити раніш не досліджені процеси і відкрити нові закони природи. В свою чергу вивчення законів природи приводить до вдосконалення способів і інструментів вимірювання. Таким чином, в науці постійно відбувається накопичення знань в нових способах вимірювання і розробки на основі відкритих законів нових способів вимірювання. Це дозволяє науці підніматися на більш високі ступені свого розвитку.

### **11.5. Експеримент**

Експеримент це особливий дослід, що має пізнавальний, цілеспрямований, методичний характер, який проводиться в штучних умовах шляхом контролю його зміни. На відміну від звичайного спостереження в експерименті дослідник активно втручається в протікання процесу, що вивчається з метою одержати про нього певну інформацію. Явище, що досліджується, спостерігається в спеціальних умовах, які контролюються і відновлюються кожний раз при їх повтореннях. Створюючи штучну систему стає можливим впливати на її шляхом перестановки елементів, а також, замінити іншими елементами.

В ході експерименту дослідник не тільки контролює і відновлює умови в яких проводиться дослідження, але й часто штучно змінює ці умови. В цьому заключається перевага експерименту зрівняно зі спостереженням. Зазвичай

контроль і зміна умов відбувається за рахунок застосування приладів. Часто експеримент здійснюється на основі теорії, що визначає постановку задач і інтерпретацію його результатів. Головною задачею експерименту є перевірка гіпотез і передбачень теорії, що має принципове значення. У зв'язку з цим, експеримент, як одна з форм практики, виконує функцію критерію істини наукового пізнання.

Основні логіко-практичні елементи експериментальної процедури:

- 1) постановка питання і висунення припускаючої відповіді;
- 2) створення експериментальної установки, яка забезпечить умови для взаємодії з об'єктом, що вивчається;
- 3) контроль зміни умов експерименту;
- 4) фіксація наслідків і визначення причин;
- 5) опис нового явища і його властивостей.

Експеримент займає провідне місце в науковому пізнанні. Особлива роль експерименту в технічних науках.

## *Лекція № 12*

### **12. Використання емпіричних наукових методів дослідження в двигунах внутрішнього згоряння**

При дослідженні складних енергетичних систем в першу чергу використовують математичні методи моделювання окремих процесів. Це пов'язано з великою кількістю напрацювань в цьому напрямі і великою кількістю математичних моделей, які уже створені. Але у випадку великої кількості факторів, що впливають на процес дослідження, використовують емпіричні наукові методи.

Емпіричний метод дослідження реалізують в такій послідовності:

- 1) формування мети і задач дослідження;
- 2) розробка методу і створення експериментальної установки;
- 3) проведення експериментального дослідження;
- 4) аналіз одержаних результатів.

#### **12.1. Дослідження механічних втрат в мікролітражному чотиритактному двигуні**

В засобах малої механізації сьогодні використовуються як двотактні, так і чотиритактні двигуни внутрішнього згоряння. Перевагами двотактних двигунів є мала питома маса, але що стосується економічності і викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами, то чотиритактні двигуни мають тут значні переваги. З цієї причини багато команд, що беруть участь в змаганнях на паливну економічність Shell “Eco-marathon” використовують чотиритактні двигуни HONDA GX25 і GX35, які розроблені для засобів малої механізації. При використанні двигунів HONDA в перегонах Shell “Eco-marathon” важливо знати механічні втрати таких двигунів для пошуку шляхів їх зменшення.

Двигун HONDA GX25, технічна характеристика якого приведена в табл. 1, встановлено на опори, що закріплені на станині.

Таблиця 12.1 – Технічна характеристика двигуна HONDA GX25

Параметри та показники	Позначення	Значення
Діаметр циліндра, мм	D	26
Хід поршня, мм	S	35
Кількість циліндрів	i	1
Ступінь стиснення	E	8
Номинальна потужність, кВт	$N_e$	0,81
Частота обертання при номінальній потужності, $\text{хв}^{-1}$	$n_H$	7000
Витрати палива на номінальній потужності, г/(кВт.год)	$g_e$	340
Максимальний крутний момент, н.м	$M_{кр\ max}$	1,25
Частота обертання при максимальному моменту, $\text{хв}^{-1}$	$N_{M\ max}$	5000
Система охолодження		повітряна
Система сумішоутворення		карбюратор
Габарити Д/Ш/В, мм		192/221/230
Вага, кг		2,78

Для визначення механічних втрат методом прокручування від стороннього джерела потрібно визначити потужність цього джерела. У випадку, коли в якості джерела є електродвигун можливо декілька варіантів визначення потужності, що визначається на обертання колінчастого вала ДВЗ:

- 1) визначення електричної потужності;
- 2) визначення механічної потужності.

В першому випадку двигун через муфту з'єднується з електродвигуном ЕД-25, який, також, жорстко закріплено на станині через опори (рис. 12.1). При цьому живлення електродвигуна відбувається від свинцевого кислотного акумулятора.

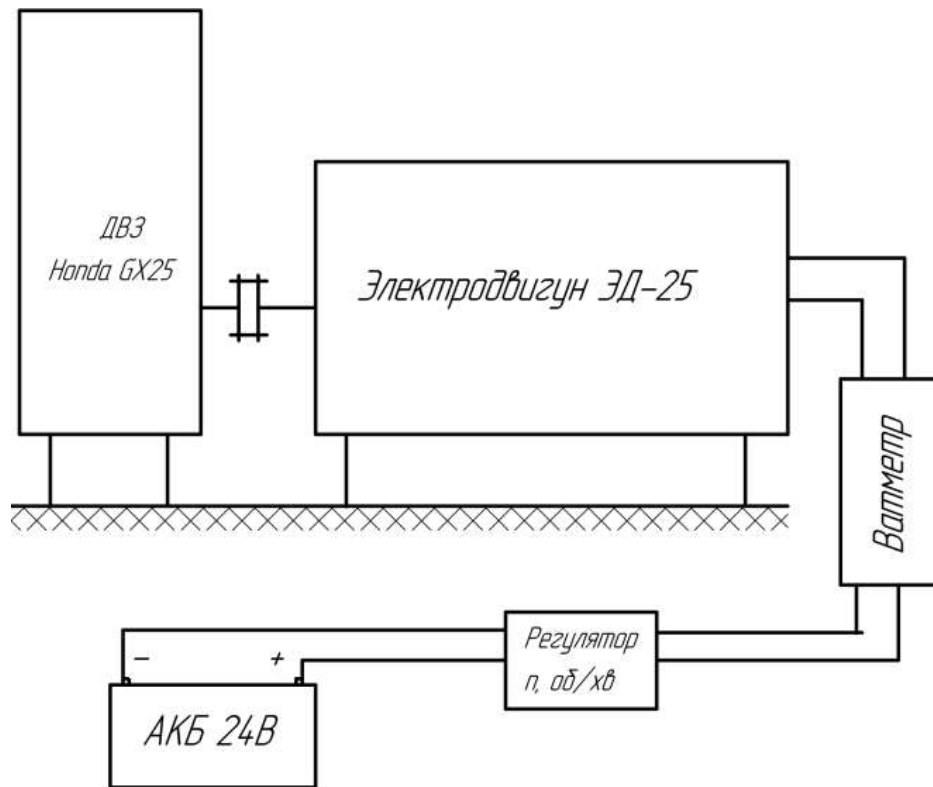


Рисунок 12.1 – Схема експериментального стенда при жорсткому закріпленні електродвигуна ЕД-25 і вимірюванні його електричної потужності

Для регулювання обертів ротора електродвигуна використовувався тиристорний регулятор напруги в інтервалі 0 – 30 В. Потужність, що розвиває електродвигун визначалась за допомогою ватметра VAN 11578, вхід якого був з'єднаний з регулятором обертів, а вихід з електродвигуном.

У другому випадку потужність механічних втрат визначалась механічним методом. Для цього статор електродвигуна ЕД-25 встановлено в підшипник качення, що дало йому змогу вільно обертатися навколо своєї осі (рис. 12.2).



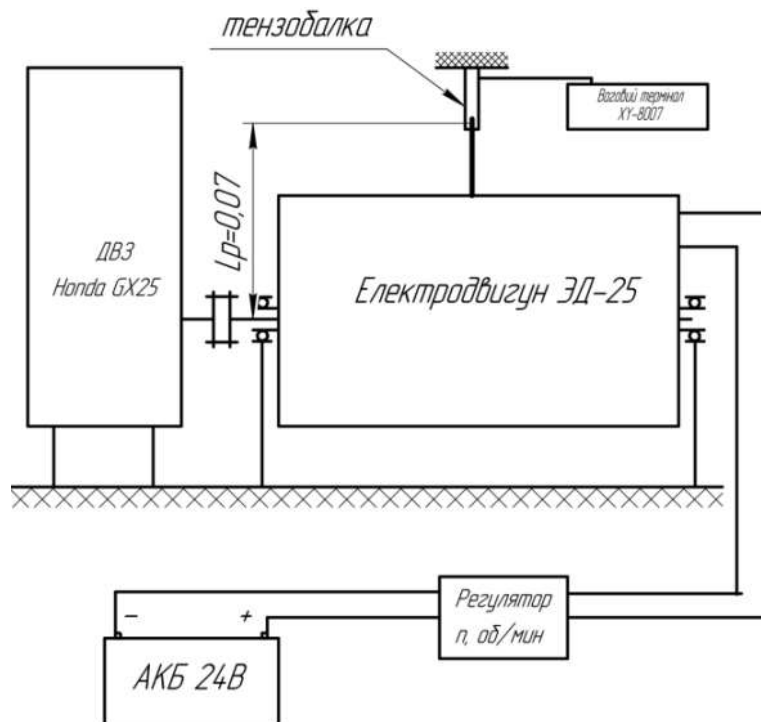


Рисунок 12.2 – Схема експериментального стенда з встановленням корпусу електродвигуна ЕД-25 в підшипник качення

До статора жорстко закріплювалась балка довжиною  $L = 0,07$  м. Під час експерименту частота обертання ротора регулювалась за допомогою тиристорного регулятора. Крутний момент розраховувався за навантаженням на тензобалку і плечем балки.

## 12.2. Побудова емпіричних залежностей за результатами експериментальних досліджень

У першому випадку, коли електродвигун був закріплений жорстко до станини, коефіцієнт корисної дії електродвигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (12.1)$$

де  $P_1 = U \cdot I$  - електрична потужність двигуна, Вт;

$U$  – напруга джерела струму, В;

$I$  – величина струму, А;

$P_2$  – механічна потужність на валу електродвигуна, яка дорівнює потужності механічних втрат  $N_m$ .

При такому дослідженні потужність механічних втрат дорівнює

$$N_m = P_1 \cdot \eta . \quad (12.2)$$

Обробка експериментальних даних методом найменших квадратів дозволила одержати

$$N_m = -25,6 + 0,0218 \cdot n . \quad (12.3)$$

де  $n$  – частота обертання колінчастого вала двигуна GX-25, хв.<sup>-1</sup>.

Середній тиск механічних втрат на основі (12.3) можна представити в такій залежності

$$p_{MB} = 0,0257 + 0,0613 \cdot \frac{n}{n_H} , \quad (12.4)$$

де  $n_H = 7000$  хв.<sup>-1</sup> – номінальна частота обертання двигуна.

У другому випадку дослідження, коли статор електродвигуна встановлювався на підшипниках кочення за допомогою вагового кочення за допомогою вагового терміналу ХУ-8007 визначалась сила  $P$ , що діє на тензобалку. Крутний момент

$$M_{кр} = P \cdot L , \quad (12.5)$$

де  $L = 0,07$  м – довжина тензобалки.

Потужність механічних втрат

$$N_M = M_{кр} \cdot \omega , \quad (12.6)$$

де  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$  - кутова швидкість обертання колінчастого вала.

Обробка експериментальних даних методом найменших квадратів дозволила одержати таку залежність

$$N_M = -25,625 + 0,02156 \cdot n . \quad (12.7)$$

Після розрахунку середнього тиску з рівняння (12.7) маємо таку залежність

$$p_{M.B.} = 0,02442 + 0,0615 \frac{n}{n_H} . \quad (12.8)$$

З рівнянь (12.4) та (12.8) видно, що значення середніх тисків механічних втрат одержані різними способами відрізняються на 1,5 %.

## *Лекція № 13*

### **13. Одержання емпіричних залежностей методами планування експерименту**

При проведенні експериментальних досліджень двигунів внутрішнього згоряння завжди прагнуть зменшити кількість експериментів і збільшити об'єм інформації, що одержують від кожного експерименту. Надійним помічником у даному випадку є математичне планування експерименту. Сутність проведення експериментів з застосуванням математичного планування експерименту полягає в тому, що шукану функцію знаходять у вигляді апроксимуючого полінома. Задача експериментального дослідження зводиться до визначення коефіцієнтів даного полінома при мінімальній кількості експериментів.

#### **13. 1. Математичне планування дослідження для оптимізації індикаторного ККД турбопоршневого двигуна**

При проектуванні і доводці двигунів внутрішнього згоряння виникає необхідність виконувати велику кількість розрахункових і експериментальних робіт, направлених на вирішення різних задач оптимізації. Задачі оптимізації можна вирішити за допомогою одержання залежності у вигляді поліному і провести його дослідження.

На прикладі судового дизеля 6ЧН26/34 знайти оптимальне значення індикаторного ККД на номінальному режимі в залежності від ступеня стиснення  $\varepsilon$ , температури повітря перед клапанами  $T_s$  і коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$ . В якості обмежуючих умов приймалась постійна циліндрова потужність  $N_{ec} = 200$  к.с., максимальний тиск згоряння  $p_z = 12,5$  МПа і час згоряння палива  $\varphi = 130^0$  п.к.в. Крім цього, тиск механічних втрат прийнятий постійним  $p_{м.в.} = 0,2$  МПа.

Для проведення дослідження необхідно одержати залежність

$$\eta_i = f(\varepsilon, T_s, \alpha). \quad (13.1)$$

Для дослідження вибираємо область, що обмежується зміною  $\varepsilon = 11,5 \dots 13,5$ ;  $T_s = 313 \dots 353$  К;  $\alpha = 1,9 \dots 2,3$ .

Залежність (13.1) вдається описати поліномом другого ступеня

$$y = a_0 + a_1 \cdot \varepsilon + a_2 \cdot T_s + a_3 \cdot \alpha + a_{11} \cdot \varepsilon^2 + a_{22} \cdot T_s^2 + a_{33} \cdot \alpha^2 + a_{12} \cdot \varepsilon \cdot T_s + a_{13} \cdot \varepsilon \cdot \alpha + a_{23} \cdot T_s \cdot \alpha. \quad (13.2)$$

План проведення експерименту представлений в табл. 13.1. Коефіцієнти рівняння (13.2) знаходимо методом найменших квадратів в середовищі MatLAB.

Таким чином одержана залежність

$$\eta_i = -1,4701 + 0,1185 \cdot \varepsilon + 0,00362 \cdot \alpha - 0,0015 \cdot \varepsilon^2 - 0,1275 \cdot 10^{-5} \cdot T_s^2 - 0,0537 \cdot \alpha^2 - 0,00013 \cdot \varepsilon \cdot T_s - 0,0206 \cdot \varepsilon \cdot \alpha - 0,00072 \cdot T_s \cdot \alpha. \quad (13.3)$$

Одержана залежність (13.3) дозволяє проводити дослідження і в більш широких діапазонах зміни  $\varepsilon$ ,  $T_s$  та  $\alpha$ . При цьому треба розуміти, що точність одержаних результатів знизиться.

Відомо, що у випадку обмеження максимального тиску згоряння  $p_z$  зростання  $\eta_i$  при зменшенні  $\varepsilon$  відбувається в результаті зростання ступеня підвищення тиску  $\lambda$ , збільшення ступеня попереднього розширення  $\rho$  і все це свідчить про підвищення якості згоряння палива.

Оптимум індикаторного ККД  $\eta_i$  знаходиться в результаті аналітичного дослідження на екстремум функції  $\eta_i = f(\varepsilon, T_s, \alpha)$  і відповідає  $\varepsilon = 10,6$ ,  $\alpha = 1,82$ ,  $T_s = 313$  К.

Таблиця 13.1 – Ортогональний план проведення дослідження

№ досліду	Нормовані фактори			Дійсні змінні			$\eta_i$ експериментальне значення
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\varepsilon$	$T_s, K$	$\alpha$	
1	2	2	2	13,5	353	2,3	0,441
2	2	2	-2	13,5	353	1,9	0,467
3	2	-2	2	13,5	313	2,3	0,468
4	2	-2	-2	13,5	313	1,9	0,479
5	-2	2	2	11,5	353	2,3	0,467
6	-2	2	-2	11,5	353	1,9	0,473
7	-2	-2	2	11,5	313	2,3	0,48
8	-2	-2	-2	11,5	313	1,9	0,481
9	0	0	0	12,5	333	2,1	0,475
10	2	0	0	13,5	333	2,1	0,468
11	-2	0	0	11,5	333	2,1	0,478
12	0	2	0	12,5	353	2,1	0,467
13	0	-2	0	12,5	313	2,1	0,481
14	0	0	2	12,5	333	2,3	0,468
15	0	0	-2	12,5	333	1,9	0,477
16	1	0	0	13,0	333	2,1	0,472
17	-1	0	0	12,0	333	2,1	0,476
18	0	1	0	12,5	343	2,1	0,471
19	0	-1	0	12,5	323	2,1	0,478
20	0	0	1	12,5	333	2,2	0,471
21	0	0	-1	12,5	333	2,0	0,476

### 13.2. Аналіз одержаної емпіричної залежності

Враховуючи, що в сучасних турбопоршневих двигунах з високим рівнем форсування по середньому ефективному тиску  $p_e$  і обмеженню по максимальному тиску згоряння  $p_z$  з метою забезпечення прийнятної теплової напруженості деталей двигуна і турбіни. Необхідно звернути увагу забезпеченню надійності пуску і стійкій роботі двигуна на малих навантаженнях при низьких

ступенях випускних газів в циліндри двигуна, дроселюванням випускних газів в циліндри двигуна, дроселюванням випускних газів і встановленням свічок накаливання у впускних колекторах.

Одержана залежність (13.3) крім знаходження оптимуму дозволяє з достатньою точністю описати інші параметри і їх складові, а також дати можливість відслідкувати зміну цих параметрів за межами цієї області.

### Лекція № 14

#### 14. Побудова емпіричної залежності викидів $NO_x$ від коефіцієнту надлишку повітря дизельного двигуна

Методологія сучасного експериментального дослідження екологічних показників включає такі етапи: глибоке розуміння процесів, які відбуваються в об'єкті дослідження; планування експерименту; використання сучасних методик і діагностичних комплектів, що забезпечують необхідну точність вимірювання; побудова емпіричних залежностей за результатами досліджень.

Стендові випробування дизеля ЯМЗ-236 дозволили одержати такі результати щодо викидів  $NO_x$  у відпрацьованих газів в залежності від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  (табл.14.1). Необхідно побудувати емпіричну залежність викидів  $NO_x$  від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  у вигляді лінійної залежності

$$g_{NO_i} = a \cdot \alpha + b \quad . \quad (14.1)$$

Для реалізації метода найменших квадратів необхідно визначити

$$g_{NO_i} - a \cdot \alpha_i - b = \varepsilon_i \quad , \quad (14.2)$$

де  $\varepsilon_i$  – різниця між експериментальним і розрахованими згідно рівняння (14.1) значеннями в  $i$ -ій експериментальній точці, цю величину називають нев'язкою;

$i = 1, 2, 3 \dots 10$  – номери експерименту.

Умови мінімуму такі

$$F = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (g_{NO_i} - a \cdot \alpha_i - b)^2 = \min \quad . \quad (14.3)$$



Таблиця 14.1 – Результати експериментальних випробувань дизеля ЯМЗ-236

№ п/п	$\alpha_i$	$g_{NOi}$ млн. <sup>-1</sup>	$\alpha_i \cdot g_{NOi}$	$\alpha_i^2$
1	1,5	1208	1812	2,25
2	2	1083	2166	4
3	2,5	960	2400	6,25
4	3,0	833	2499	9,0
5	3,5	720	2520	12,25
6	4,0	600	2400	16,0
7	4,5	500	2250	20,25
8	5,0	417	2085	25,0
9	5,5	334	1837	30,25
10	6,0	215	1290	36,0
	$\Sigma = 37,5$	$\Sigma = 6870$	$\Sigma = 21259$	$\Sigma = 161,25$

Якщо використати умову екстремуму функції кількох змінних при варіації параметрів  $a$  і  $b$ , одержуємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial a} &= 2 \sum (g_{NO} - a \cdot \alpha - b) \cdot (-\alpha) = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial b} &= 2 \sum (g_{NO} - a \cdot \alpha - b) \cdot (-1) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (14.4)$$

Звідки

$$\left. \begin{aligned} a \sum \alpha^2 + b \sum \alpha &= \sum \alpha \cdot g_{NO}, \\ a \sum \alpha + n \cdot b &= \sum g_{NO}. \end{aligned} \right\} \quad (14.5)$$

Система (14.5) називається системою нормальних алгебраїчних рівнянь. Вирішуючи її, одержуємо параметри  $a$  і  $b$  в загальному вигляді.

З другого рівняння системи (14.5) визначимо  $b$

$$b = \frac{\sum g_{NO} - a \sum \alpha}{n} \quad (14.6)$$

і підставимо це значення в перше рівняння системи (14.5)

$$a \cdot \sum \alpha^2 + b = \frac{\sum g_{NO} - a \sum \alpha}{n} \cdot \sum \alpha = \sum \alpha \cdot g_{NO}.$$

Звідки після перетворення, одержимо

$$a \cdot n \cdot \sum \alpha^2 + \sum g_{NO} \cdot \sum \alpha - a (\sum \alpha)^2 = n \sum \alpha \cdot g_{NO}$$

або

$$a \left[ n \sum \alpha^2 - (\sum \alpha)^2 \right] = n \sum \alpha \cdot g_{NO} - \sum \alpha \cdot \sum g_{NO}$$

$$a = \frac{n \sum \alpha \cdot g_{NO} - \sum \alpha \cdot \sum g_{NO}}{n \sum \alpha^2 - (\sum \alpha)^2} = \frac{10 \cdot 21259 - 37,5 \cdot 6870}{10 \cdot 161,25 - (37,5)^2} = -218,35 .$$

Далі визначаємо  $b$  з рівняння (14.6)

$$b = \frac{\sum g_{NO} \cdot \sum \alpha^2 - \sum \alpha \cdot \sum \alpha \cdot g_{NO}}{n \sum \alpha^2 - (\sum \alpha)^2} = \frac{6870 \cdot 161,25 - 37,5 \cdot 21259}{10 \cdot 161,25 - (37,5)^2} = 1505,8 .$$

Емпірична залежність викидів  $NO_x$  від коефіцієнта надлишку повітря має вигляд

$$g_{NO} = 1505,8 - 218,35 \cdot \alpha \quad (14.7)$$

Для оцінки близькості теоретичного та емпіричного розподілів застосовуються кількісні критерії, які називаються критеріями згоди.

Таблиця 14.2

№ п/п	$g_{NO_E}$ МЛН <sup>-1</sup>	$g_{NO_T}$ МЛН <sup>-1</sup>	$\varepsilon$ МЛН <sup>-1</sup>	$\varepsilon^2$ (МЛН. <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	$\frac{\varepsilon^2}{g_{NO_T}}$ , МЛН <sup>-1</sup>
1	1208	1178,28	29,71	882,98	0,749
2	1083	1069,11	13,89	192,9	0,1804
3	960	959,93	0,07	0,0049	0,00005
4	833	850,76	-17,76	315,41	0,3707
5	720	741,58	-21,58	465,7	0,628
6	600	632,41	-32,41	2441,35	3,86
7	500	523,23	-23,23	539,6	1,03
8	417	414,04	-2,94	8,64	0,2087
9	334	304,88	29,11	847,63	2,78
10	215	195,71	19,29	372,1	1,901
					$\Sigma = 11,7$

Для застосування критерія Пірсона або  $\chi^2$  проводимо розрахунки, які приведені в табл. 14.2.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(g_{NO_E} - g_{NO_T})^2}{g_{NO_T}}, \quad (14.8)$$

де  $g_{NO_E}$  - викиди  $NO_x$  одержані експериментально;

$g_{NO_T}$  - викиди  $NO_x$  одержані згідно залежності (14.7).

В табл. 14.2 різниця між експериментом і теоретичною залежністю

$$\varepsilon = g_{NO_E} - g_{NO_T}.$$

В даному експериментальному дослідженні кількість інтервалів розподілу  $l = 9$ , при цьому число степенів вільності

$$\nu = l - 1 + 9 - 1 = 8.$$

За визначеним  $\chi^2 = 11,7$  та кількістю ступенів вільності  $\nu = 8$  знаходимо  $P(\chi^2) = 0,2$ . (Справочник по надежности. W.Grant Ireson. – М.:Мир 1964. – т.1 – 295 с.). Оскільки  $P(\chi^2) > 0,05$ , то теоретичний закон розподілу вважається виявленим.

На практиці ще користуються коефіцієнтом точності

$$H = \frac{\chi^2}{\nu} = \frac{11,7}{8} = 1,46. \quad (14.9)$$

Коефіцієнт точності повинен знаходитися в межах  $0 \dots 2$ , як бачимо, що виявлення задовільне. Якщо скористатися критерієм Романовського

$$R = \frac{(\chi^2 - \nu)}{\sqrt{2\nu}} = \frac{(11,7 - 8)}{\sqrt{2 \cdot 8}} = 0,925. \quad (14.10)$$

Як бачимо, що і критерій Романовського ( $R < 3$ ) також підтверджує, що одержані експериментальні дані про викиди  $NO_x$  в залежності від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  задовільно описуються лінійною залежністю.

## Розділ III. Теоретичні наукові методи.

### *Лекція №15*

- 15.1. Теоретичні знання
- 15.2. Метод розумового експерименту.
- 15.3. Ідеалізація і формалізація.
- 15.4. Аксиоматичний метод.

#### **15.1. Теоретичні знання**

В наукових диспутах термін «теорія» використовується в двох значеннях, які відрізняються один від одного. В широкому розумінні під словом «теоретичний» розуміється пізнавальна діяльність взагалі. В цьому розумінні «теорія» часто співставляється з практичною діяльністю людини. Тут зазвичай говорять про співвідношення теорії і практики, теоретичної і практичної діяльності людини. В більш вузькому значенні під теорією розуміють не всю пізнавальну діяльність, а лише високі її рівні, де концентруються знання про найбільш суттєві і фундаментальні властивості діяльності, а також, розкриваються основні закономірності. Таким чином, теорію можна визначити як цілісну систему поглядів, ідей і представлень, які розривають суттєві властивості і закономірні зв'язки об'єктивної дійсності. Сучасна наука представляє собою систему різних теорій, на основі яких вдається побудувати пояснення емпіричних фактів і вивести передбачення нових. В цілому, теоретичні знання мають дедуктивну структуру, тут можна виділити загальні поняття, принципи і гіпотези, які складають теоретичний базис і систему витікаючі з цього базису наслідок. Особливістю теорій є використання математичного формалізму, які реалізуються в побудові математичних моделей і математичних гіпотез. Використання математичного апарату є потужним інструментом сучасного наукового пізнання. В той же час теоретичні знання мають складну структуру і формально

математична частина представляє лише одну із сторін, але не всю теорію. Крім цієї частини теорія включає в себе особу ідеалізовану модель дійсності, оперування якого здійснюється у формі розумового експерименту.

Теоретична мова спілкування між абстрактними об'єктами теоретичної моделі пов'язана з реальністю яка спостерігається. За рахунок цього зв'язку теоретичні висновки мають об'єктивний зміст. В основі будь-якої теорії можна відстежити сітку абстрактних об'єктів, які визначають специфіку даної теорії. Цю сітку можна представити як фундаментальну теоретичну схему – абстрактну ідеалізовану модель дійсності, яка вивчається в рамках теорії.

Теорія створюється з метою пояснення якогось класу явищ. Будучи збудованою, вона одночасно виступає і в функції пояснення і в функції передбачення, котрі тісно пов'язані між собою.

Пояснення є однією з найбільш важливих задач наукового знання. Саме в процесі пояснення розкриваються суттєві сторони і відношення предметів, встановлюються внутрішні зв'язки явищ і їх закономірна обумовленість. Пояснити явища це означає визначити його фундаментальну властивість і відношення, виявити загальні закони, котрим воно підкорюється. З логічної точки зору пояснення представляють собою включення об'єктів в систему теоретичного знання, їх поведінка під загальними положеннями і принципами науки.

Побудова теорії як спроба дати пояснення явищ, що вивчаються, не означає завершення наукового пошуку, Вчені на базі знань завжди стараються передбачити існування нових явищ. Цю задачу виконує наукове передбачення. Сутність передбачення складається в тому, що за його допомоги вдається попередити хід і розвиток подій або дати опис таких явищ, з якими ще не зустрічалась наука і практика. Логічно. основою передбачення є наявність теорії, що розкриває загальні закономірності, на базі яких є можливість описувати нові області дійсності.

Основною метою наукової теорії є визначення загальних закономірностей і пояснення на їх основі невідомих явищ. Основною функцією сформованої теорії є пояснення і передбачення нових явищ.

В ході свого розвитку теорія завжди об'єднує якомога більше фактів. До тих пір, поки ці факти відносяться до предметної області, основні закони асимують ці факти і успішно розвиваються. Але в своєму розвитку теорія може зустрітися з такими фактами, котрі будуть вимагати пояснення принципово нових теоретичних представлень.

Побудова нової теорії потрібна для вирішення наукової проблеми. Проблема акцентує увагу дослідника на парадоксах попередніх теорій і потребує їх вирішення. Новий спосіб їх аналізу приводить до висування гіпотез, які являються попередньою формою побудови теоретичного знання. Гіпотеза – це передбачення про явище дійсності, їх фундаментальну властивість і розвиток, це пропозиція пояснення нового явища, що побудована на основі обмеженого числа емпіричних даних.

Гіпотеза носить ймовірний характер і потребує логічного обґрунтування та емпіричного підтвердження.

## **15.2. Метод розумового експерименту**

На теоретичному рівні використовуються всі універсальні прийоми пізнання, але реалізуються вони через систему специфічних способів характерних для даного рівня дослідження. Серед цих прийомів значне місце займає розумовий експеримент. Характерною особливістю теоретичного мислення є застосування абстрактних об'єктів. Дослідник розвиває теорію і завжди маніпулює у своєму уявленні з особливими образами дійсності, які характеризують в узагальненій формі найбільш суттєві ознаки явища, що вивчається. Такі образи суть абстрактні об'єкти теоретичного рівня знань. Побудова абстрактних об'єктів як теоретичних образів реальної дійсності і оперування ними з метою вивчення суттєвих характеристик дійсності складають задачу розумового експерименту, Тому роль розумового експерименту особливо велика в процесі зародження нового теоретичного знання.

В методології науки розумовий експеримент трактується, з одного боку, як розумовий процес, який представляє план майбутнього реального експерименту; з іншого боку, під розумовим експериментом розуміється особливий вид розумової діяльності, при якому продумується хід реального експерименту, а існуюча така комбінація розумових образів, які в дійсності взагалі не можуть бути реалізовані.

Будь-який розумовий експеримент починається з продумування операції, яку можливо практично здійснити, причому між реальним і розумовим експериментами важко знайти різницю. Ця різниця знаходиться там, де думка переходить в область практично нездійснених речей ідеалізованих об'єктів. Тому синонімом розумового експерименту є термін «ідеалізований експеримент».

### **15.3. Ідеалізація і формалізація**

В процесі розумового експерименту дослідник часто ідеалізує ситуацію. Такі ситуації конструюються в результаті операції, яка називається ідеалізацією. Цей різновид операції абстрагування застосовується для теоретичного дослідження. Суть цієї операції заключається в тому, що при вивченні об'єкта виділяють одну умову існування об'єкта, а потім зводять дію цієї умови до мінімуму. В результаті такої дії об'єкт не може існувати в дійсності, але має прообрази у реальному світі.

Ідеалізованими об'єктами оперує будь-яке теоретичне мислення. Ідеалізовані об'єкти мають велике значення, так як з їх допомоги можна будувати теоретичні моделі і формувати теоретичні закони, які дають пояснення тим чи іншим явищам. Ідеалізовані об'єкти є необхідними елементами розвитку теоретичних знань. Разом з тим ідеалізація, як всякий науковий метод, має свої межі і в цьому сенсі носить відносний характер. Відносність її проявляється в тому, що:

- ідеалізовані представлення можуть уточнюватися, корегуватися і навіть замінюватися новими;



- кожна ідеалізація створюється для вирішення певних задач, тобто властивість від якої дослідник абстрагується в одних умовах, може бути важливо при реалізації інших умов, в цьому випадку приходится створювати принципово нові ідеальні об'єкти;
- не у всіх випадках є можливість перейти від ідеалізованих представлень безпосередньо до емпіричних об'єктів і для такого переходу потрібні певні корективи.

У зв'язку з математизацією науки в ній все ширше використовується теоретичне мислення – формалізація.

Такий спосіб заключається в побудові абстрактних математичних моделей, які розкривають суть процесів, що вивчаються в дійсності. При формалізації роздумів про об'єкти переносяться в площину оперування зі знаками (формулами). Відношення знаків замінюють собою характеристики про властивості і відношення предметів. Таким шляхом створюється узагальнена знакова модель предметної області, що дозволяє відслідкувати структуру різних явищ і процесів при відволіканні від якісних характеристик цих процесів.

Виведення одних формул з інших за суворими правилами логіки і математики представляють собою формальне дослідження основних характеристик структури різних явищ. В ряді випадків аналіз формальних моделей дозволяє визначити такі теоретичні закономірності, які не можливо було відкрити емпіричним шляхом. Крім того, визначення структурної подібності дозволяє використати математичний апарат, розроблений для опису одних процесів, може використовуватися для інших. Найбільш успішно формалізація застосовується в математиці, логіці і лінгвістиці.

#### **15.4. Аксиоматичний метод**

При аксіоматичній побудові теоретичних знань спочатку задається набір вихідних положень, який не потребує доказів. Ці положення називають аксіомами або постулатами. Далі з них за окремими правилами будується система вихідних

пропозицій. Сукупність вихідних аксіом і виведених на їх основі пропозицій створюють аксіоматично побудовану теорію.

Аксіоми це ствердження, докази істинності яких не потрібне. Логічний висновок дозволяє переносити істинність аксіом на наслідок, що витікає з них. Фіксація певних правил одержання висновків дозволяє упорядкувати процес міркування при побудові аксіоматичної системи, зробити ці міркування більш суровими і коректними. Тим самим аксіоматичний метод полегшує організацію і систематизацію наукового знання і служить засобом побудов наукової теорії. Найбільш широко аксіоматичний метод використовується в математиці. Він застосовується в емпіричних науках, але з урахуванням ряду особливостей, пов'язаних з експериментальною перевіркою теорії.

Однією з перших і успішних спроб застосування аксіоматичного методу в науці була геометрія Евкліда. Спираючись на п'ять вихідних аксіом (постулатів), Евклід розгорнув систему доказів цілого ряду теорем, коли більш складні положення геометрії зводились до якісних і простих, істинність яких не викликала сумніву. Геометрія Евкліда довгий час залишалась взірцем теоретичного знання і розглядалась як ідеал побудови теоретичних систем. У відповідності з цим ідеалом створювались теорії і в інших областях наукових знань.

## *Лекція №16*

16.1. Гіпотетико-дедуктивний метод.

16.2. Перехід від абстрактного до конкретного.

16.3. Історичний і логічний методи.

### **16.1. Гіпотетико-дедуктивний метод**

В математиці і логіці теорією рухається формальна або формалізована аксіоматична система, яка інтерпретується на різних моделях. Причому теорію відрізняють від таких моделей. В емпіричних науках модель, яка пов'язує математичний формалізм теорії з дослідом обов'язково включає в склад теорії. Модель повинна бути обґрунтована, як ідеалізована схема взаємодії, що фіксується в досліді. Звідси виникає особливість побудови теоретичних знань в емпіричних науках. Специфічним способом такої побудови є гіпотетико-дедуктивний метод, суть якого заключається в створенні системи дедуктивно пов'язаних між собою гіпотез, з яких виводяться ствердження про емпіричні факти. Цей метод почав використовуватись ще в 15 сторіччі, але об'єктом методологічного аналізу він став порівняно недавно, коли почала виявлятися специфіка теоретичного знання порівняно з емпіричним дослідженням.

Розвинені теоретичні знання «будуються не знизу» за рахунок індуктивних узагальнень наукових фактів, а розгортаються ніби «зверху» по відношенню до емпіричних даних. Метод побудови таких знань заключається в тому, що спочатку створюється гіпотетична конструкція, яка дедуктивно розкривається створюючи систему гіпотез, а потім ця система піддається дослідній перевірці, в процесі якої вона уточнюється і конкретизується. В цьому і заключається суть гіпотетико-дедуктивного розгортання теорії. Дедуктивна система гіпотез має ієрархічну будову. Перш за все, в ній є гіпотеза (або гіпотези) верхнього ярусу і гіпотези нижніх ярусів, які є наслідком перших гіпотез. Кожна гіпотеза вводиться так, щоб за допомогою логічних або логіко-математичних методів з неї можна

було вивести інші гіпотези, а гіпотези нижнього ярусу безпосередньо перевірити з дослідними даними. В розвинених науках частіше всього мають справу не з однією, а з цілою системою гіпотез верхнього ярусу, з яких виводиться наслідок, що перевіряється у досліді.

Характерною особливістю гіпотетико-дедуктивної системи є її цілісність. В процесі емпіричної перевірки з дослідом зрівнюється вся система гіпотез як одне ціле і це робить процес перебудови гіпотез складною процедурою. Найбільш простим випадком є випадок коли одна гіпотеза верхнього ярусу і з нею однозначно йде лінійний ланцюжок проміжних гіпотетичних висновків які зрівнюються з дослідом. В цьому випадку дослідні дані зразу ж перевіряють гіпотезу. Але частіше наука має справу з більш складними варіантами, коли верхній ярус гіпотетичної системи включає в себе декілька гіпотез, а з цього виходить, а з цього виходить розгалужена система проміжних висновків. В цьому випадку неузгодженість гіпотетичної системи з дослідом не значить що в ній несправедливі всі гіпотетичні положення. Може бути, що несправедлива тільки одна гіпотеза, в той час як інші являються правильними, але ж дослід свідчить проти всієї системи гіпотез. Перебудова гіпотетико-дедуктивної системи часто викликає великі труднощі і потребує від вчених значних творчих зусиль.

По мірі розвитку гіпотетико-дедуктивної системи і перетворення її в теорію, в ній виділяється головна частина, так зване ядро системи, до якого відноситься гіпотеза верхнього ярусу і периферія гіпотези, що створює проміжний шар між ядром і емпіричними даними.

Гіпотетико-дедуктивний метод може бути в двох різновидах. Він може представляти собою побудову системи гіпотез з подальшим їх вираженні на мові математики і виступає у вигляді способів створення формальної системи і її інтерпретацією. У першому випадку вводиться система понять, яка одержує математичний опис, у другому випадку шлях побудови інший: спочатку будується математичний апарат, який в подальшому одержує змістовну інтерпретацію.

## 16.2. Перехід від абстрактного до конкретного

Задача теоретичного пізнання заключається в тому, щоб одержати образ процесу, що досліджується в цілому. Будь-який процес в дійсності можна представити як конкретне поєднання різних зв'язків. Теоретичне дослідження виділяє ці зв'язки і відображає їх за допомогою певних наукових абстракцій. Але простий набір таких абстракцій не дає представлення про природу об'єкта, його функціонування і розвитку. Для того, щоб створити таке представлення, необхідно розумово його відтворити процес у всій повноті і складності його зв'язків і відношень. Такий спосіб дослідження називають методом переходу від абстрактного до конкретного. Застосовуючи його, дослідник спочатку знаходить головний зв'язок об'єкта, що вивчається, а потім крок за кроком досліджує як цей зв'язок змінюється в різних умовах, відкриває нові зв'язки, встановлює їх взаємодію і таким шляхом відтворює суть об'єкта, що вивчається. Метод переходу від абстрактного до конкретного застосовується при побудові різних наукових теорій і може використовуватись як у суспільних так і в природних науках.

Метод переходу від абстрактного до конкретного є найбільш важливим теоретичним способом, що забезпечує рух від перших загальних і абстрактних визначень до системи визначень, які відтворюють розумову взаємодію цих сторін.

Побудова теорії шляхом виведення наслідку з вихідних понять і висловів припускає і аксіоматичний метод, Тому зовні може здатися, що метод переходу від абстрактного до конкретного виступає лише в якості специфічного прояву аксіоматичного підходу. Однак, при більш детальному розгляді виявляється, що між вказаними методами є суттєва різниця. При побудові теорії аксіоматичним методом достатньо мати аксіоми і правила виведення щоб мати теоретичну систему. У випадку застосування методу переходу від абстрактного до конкретного нові ствердження вводять шляхом відповідного вивчення реальних зв'язків об'єкта за рахунок додавання нових умов, від яких дослідник спочатку

відмовлявся. Головний зв'язок що виділяється в якості вихідного елемента об'єкта трансформується в більш складні зв'язки, які виражаються в формі нових теоретичних визначень даного об'єкта.

Таким чином, розгортання теорії у випадку використання метода переходу від абстрактного до конкретного здійснюється шляхом постійного зведення до об'єкту, з яким дослідник проводить реальні або розумові експерименти і на цій основі крок за кроком відтворює розумово конкретне переплетіння його існуючих зв'язків. Перехід від одних стверджень до інших йде шляхом синтезу одержаних раніше знань, цілеспрямованим реальним оперуванням з об'єктом.

Будучи одним з важливих способів побудови теорії, метод переходу від абстрактного до конкретного застосовується у сучасному науковому дослідженні поряд з аксіоматичним і гіпотетико-дедуктивним методами. Ці методи мають свою специфіку і можуть використовуватися в певному поєднанні один з одним.

### **16.3. Історичний і логічний методи**

При вивченні складних систем, що розвиваються, особливе значення має історичний і логічний методи дослідження. Процес розвитку, як і будь-який об'єктивний процес дійсності, розпадається на явища і сутність, на емпіричну історію і основну лінію розвитку, його закономірність, відображення якої складає основну мету теоретичного пізнання. Виявити такі закономірності можна двома способами: історичним і логічним.

Історичний метод припускає від слідкування історії у всій його повноті, узагальнення емпіричного матеріалу і визначення на цій основі історичної закономірності. Але цю закономірність можна виявити і не звертаючись до реальної історії, а вивчаючи процес на вищих стадіях його розвитку, що і складає основну мету логічного методу. Об'єктивною основою цього методу є те, що на вищих стадіях розвитку об'єкта в процесі функціонування відтворюються основні риси попередніх етапів розвитку. Причому історія фіксується в структурі об'єкта

тільки в тих моментах, які були суттєвими для становлення і виступають в очищеному від випадковостей виді.

Наукове пізнання об'єктів, що розвиваються, в однаковій мірі використовує як логічний так і історичний методи. В тих випадках де є можливість безпосередньо вивчити минуле хоч би по залишкам, що залишилися до теперішнього часу, може переважати історичний метод, де такої можливості немає, використовують логічний метод. В цілому, історичний і логічний методи доповнюють один одного, це дозволяє переходити від структури існуючого об'єкта і законів його функціонування до законів розвитку і навпаки, від історії розвитку до структури існуючого об'єкту.

Будучи тісно пов'язані між собою і доповнюючи один одного, історичний і логічний методи виступають як рівноправні по своєму теоретичному статусу. Історичний метод, спираючись на історію переходить від його емпіричного різноманіття до загальних законів розвитку. Логічний метод, направлений на вивчення існуючого предмета, також починає свій рух з виявлення основних емпіричних характеристик предмета з наступним виділенням основних елементів структури, знання яких дуже важливе як для визначення функціонування предмета, так і для визначення загальних законів його розвитку.