

УДК 621.43.01: 519.876.5: 004.424.43

Канд. техн. наук В. О. Мазін

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

## МАШИННА ОБРОБКА ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕСОРА І ТУРБИНИ ТЕПЛООВОГО ДВИГУНА Й АГРЕГАТА НАДДУВУ КОМБІНОВАНОГО ДВЗ

*Складено алгоритм машинної обробки двох функцій двох загальних аргументів. Показав високу швидкодію і задовільну збіжність при дослідженні газодинамічних процесів у впускній і випускній системах. Відрізняється універсальністю: орієнтований на КДВЗ, може застосовуватися при рінні задач, не пов'язаних з двигунобудуванням.*

**Ключові слова:** тепловий двигун, комбінований двигун внутрішнього згоряння, агрегат наддуву, газодинамічні процеси, машинна обробка характеристики компресора, машиноорієнтований алгоритм.

### Актуальність роботи

Процеси у циліндрі і системах КДВЗ досліджують теоретично за допомогою фізико-математичних моделей, де експериментальні дані обробляються за допомогою різних алгоритмів. Ці алгоритми орієнтовані на прості залежності [1-3] і використовувати їх не завжди зручно, оскільки у більшості випадків дані є багатопараметрові залежності, сполучені графіки і таблиці декількох функцій одного чи декількох аргументів, часто не нормалізовані за ціною розподілу чи початком відліку. Тому розробка розрахункової методики, що спрощує відповідні дії є актуальною.

### Мета і завдання роботи

При дослідженні теплових двигунів і КДВЗ використовуються різні дані у вигляді графіків і таблиць: теплофізичні характеристики робочого тіла, теплова характеристика охолоджувача наддувочного повітря, аеродинамічні характеристики клапанних органів газорозподілу, витратні характеристики лопаткових машин агрегата наддуву. Метою дійсної роботи є розробка універсального алгоритму машинної обробки характеристик агрегатів і пристроїв комбінованого ДВЗ. Досягнення мети пов'язане з вирішенням таких задач: забезпечення об'язкового потрапляння в область визначення, пошук найближчого оточення, визначення шуканої величини. У якості прикладу за допомогою цього алгоритму розрахувати дійсний коефіцієнт тепловіддачі випускного колектора дизеля 6ЧН-12/14 у різні моменти циклу.

### Матеріали і результати дослідження

Стан системи визначається числовими значеннями її величин (показників, параметрів, характеристик); стан визначений, коли відомі значення всіх величин.

У практичних розрахунках визначають одні стани за даними інших, скласти алгоритм машинної обробки таких матеріалів не просто, труднощі пов'язані з

прагненням до універсального алгоритму для всіх матеріалів – в інтересах стислості програмного забезпечення (ПрЗб), вихідні матеріали (первинні), крім того, ненормалізовані, як правило: ціна розподілу (крок) не однакова чи відсутня, відлік починається не з початку координат (є розриви: матеріали складені).

Найближче оточення стану (НО) – це 2 найбільш наближених визначених стани за даними – «сусіди».

Пріоритет надається універсальним алгоритмам машинної обробки різноманітних даних задля стислості програмного забезпечення.

Для задач подібної постановки природа залежності і функціональна підпорядкованість неістотні: важливо, що величини взаємозалежні. Стани в більшості відомі, є стани задані (орієнтири) і такі, що визначаються; відповідно розрізняються величини «відомі» й «що визначаються». Такі задачі відносяться до розряду переборних, через крокову невизначеність розв'язуються в операціях з порядковими номерами членів числового ряду (станів).

Послідовність дій:

- 1) перевірка відповідності області визначення (влучення у поле характеристики),
- 2) компенсація ненормалізованості даних: початку відліку, розривів, ціни розподілу,
- 3) пошук найближчого оточення,
- 4) усікання бази даних, локалізація, конкретизація: відкидається зайва непотрібна інформація, віддалена від стану, що визначається – порівняно з найближчим оточенням,
- 5) вибір, ідентифікація і визначення величини за даними найближчого оточення.

Ці дії сполучені з асоціацією і синтезуванням даних – для раціональності процедур обміну інформацією, виконуються за правилами дій над матрицями і числовими рядами; застосовуються при пошуку найближчого оточення – метод послідовного наближення (половинного ділення) [4], при усіканні бази даних –

переміщення осей координат, скорочення множини до підмножини, при визначенні величини за даними найближчого оточення – лінійна інтер- чи екстраполяція, апроксимація [5].

За базовий приймається загальний випадок: числа без якогось кроку орієнтовані за зростанням, дані починаються не з початку відліку. Початок не з початку відліку і розрив на початку є тотожні поняття, початок з початку відліку вважається окремим випадком; точки перегину можуть трактуватися як збіг декількох суміжних станів.

Перед використанням первинні матеріали спеціальним чином готують: погоджують одиниці виміру, перетворюють графіки до табличного виду. Дані упорядковують, маючи на увазі збіжність ітераційних процесів, нумерують за законом ряду натуральних чисел: дотримуючись сплосності порядкових номерів і прагнучи до мінімальної розмірності матриць (наскрізна нумерація, ігнорування розривів). У результаті дані у вигляді «таблиця», «матриця» чи «числовий ряд» повинні відповідати вимозі однозначності і віддзеркалювати характер функціональних залежностей: гладкість, монотонність, перегини, кривизну, безперервність.

Повинні пошуково-обчислювальний процес швидко і надійно сходиться, алгоритми – забезпечувати необхідну точність визначення стану при мінімальному обсязі обчислень і максимальній полегшеності процедур. Ці задачі стають посильними при залученні математичних методів лінеаризації.

При визначенні можливі варіанти стану: а) відповідає області визначення характеристики (чи несуттєво від неї відхиляється), б) не збігається з жодним з відомих станів (збігається в окремому випадку). Необхідно знайти найближче оточення і за ним встановити невизначений стан (інтерполяцією, наприклад).

Алгоритми подібних задач мають безліч аналізаторів й інструкцій спрямованості процесу. Критерієм збігання станів, що визначається, і представленого на характеристиці (влучення в ціль) і ознакою завершення пошукового процесу може бути виконання умови «порядкові номери станів розрізняються на одиницю».

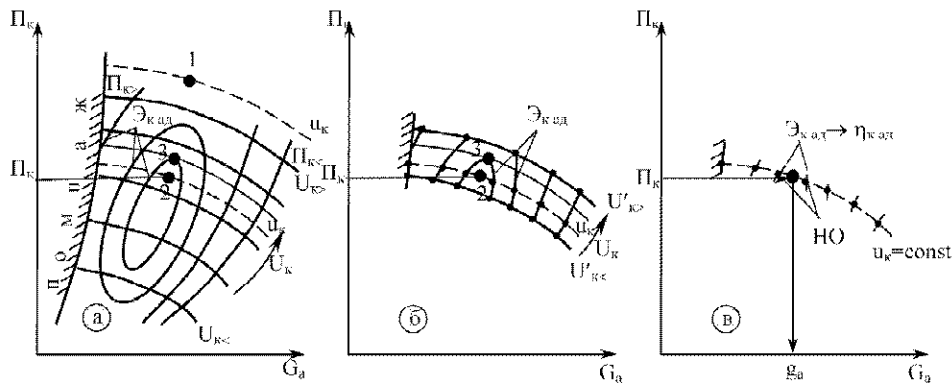


Рис. 1. Графічна ілюстрація машиноорієнтованого алгоритму визначення параметрів компресора за характеристикою

Характеристики з числом величин, менше ніж те, на яке розрахований алгоритм, адаптуються уведенням величин «порожньо». Розмірність масивів у процедурі визначається за найбільш інформативною величиною, менш інформативні величини доповнюються станами «порожньо».

Окремо для пошуку НО і визначення величини за його даними деякі нароби й алгоритми є (Fork, Interpol) [5]. У цій роботі систематизується досвід машинної обробки монотонних безперервних сполучених залежностей декількох функцій декількох загальних аргументів, закріплюється і фіксується комплекс уніфікованих дій (ПрЗб НРНС, Massif), наводяться самі найзагальніші інструкції, правила і рекомендації на прикладі обробки характеристики компресора. З залежностями дискретного і коливального характеру вони не використовувалися.

Графічна ілюстрація машинної обробки характеристики компресора наведена на рис. 1: відомі  $G_a(m), U_k(n), P_k(m, n), \partial_{k ad}(m, n), \pi_k, u_k$ ; визначаються  $g_a, \eta_{k ad}$  (великі букви – числові ряди чи матриці, що описують величини; маленькі букви – поточні значення цих величин).

Сутність дій:

1) закордон (перевіряється відповідність області визначення): 1-е найгрубіше наближення – повна база даних (рис. 1, а); НО оголошується вся область визначення: стан що визначається напевно в полі, на границі чи в безпосередній близькості характеристики (в останньому випадку – екстраполяція чи переведення на найближчу границю за визначеними угодами);

2) усікання бази даних (рис. 1, б); для найбільш визначеного параметричного аргументу зберігають 1...2, для основних – усі значення: досліджуваний стан гарантовано на обмеженому полі;

3) зведення задачі до меншого числа аргументів (аж до одного): інтерполяційним перерахунком за параметричним аргументом у співвідношенні «найближче оточення – стан, що визначається» (рис. 1, в);

4) витяг 1...2 станів з функції одного аргументу, що утворилася (найближчого оточення), що напевно утримують стан, що визначається (рис. 1, в);

5) обчислення значення шуканої величини: інтерполяцією чи розв'язанням апроксимуючого

(параметричного) рівняння (рис. 1, в) – у залежності від необхідної точності.

**Приклад методики**

Нижче наводиться практично реалізований алгоритм машинної обробки характеристики компресора агрегату наддуву дизеля 6ЧН-12/14. Методикою передбачено використання раніш опублікованих стандартних алгоритмів пошуку Fork, інтер- та екстраполяції Interpol. Великими літерами позначено таблиці вихідних даних, малими – відповідні значення характеристик стану. Також позначено: індексами  $\leftarrow, \rightarrow$  – «менший» і «більший» елементи ряду, найближчого оточення; штрихом ' – значення найближчого оточення; значками  $\Rightarrow, \Leftarrow$  – «передача інформації» у ПрЗб, «одержання інформації».

**Алгоритм**

Дано:  $G_a(m), U_k(n), P_k(m, n), \mathcal{E}_{k,ad}(m, n), \pi_k, u_k$   
 Знайти:  $g_a, \eta_{k,ad}$   
 Закордон: якщо  $u_k < U_{k\leftarrow}$  чи  $u_k > U_{k\rightarrow}$  – екстраполяція.  
 Визначення екстраполяцією  $G_a(m), P_k(m), \mathcal{E}_{k,ad}(m)$  при  $u_k$  (ПрЗб Interpol); співвідношення відповідно:  $u_k:U_{k\leftarrow}:U_{k\leftarrow+1}; u_k:U_{k\rightarrow}:U_{k\rightarrow-1}$ .  
 Закордон і помпаж: якщо  $\pi_k < P_{k\leftarrow}$ :  $\pi_k = P_{k\leftarrow}$ ,  $g_a = G_{a\leftarrow}$ ; чи якщо  $\pi_k > P_{k\rightarrow}$ :  $\pi_k = P_{k\rightarrow}$ ,  $g_a = G_{a\rightarrow}$ .  
 Пошук найближчого оточення для  $u_k$  (ПрЗб Fork):  
 $\Rightarrow U_k(n), u_k \Leftarrow U_{k\leftarrow}', U_{k\rightarrow}'$ .  
 Визначення інтерполяцією  $G_a(m), P_k(m), \mathcal{E}_{k,ad}(m)$  при  $u_k$  (ПрЗб Interpol); співвідношення  $U_{k\leftarrow}':u_k:U_{k\rightarrow}'$ .  
 Пошук найближчого оточення для  $\pi_k$  (ПрЗб Fork):  
 $\Rightarrow P_k(m), \pi_k \Leftarrow P_{k\leftarrow}', P_{k\rightarrow}'$ .

Визначення інтерполяцією  $g_a, \eta_{k,ad}$  при  $u_k, \pi_k$  (ПрЗб Interpol); співвідношення  $P_{k\leftarrow}':\pi_k:P_{k\rightarrow}'$ .

**Дослідження тепловіддачі**

Коефіцієнт тепловіддачі випускного колектора дизеля 6ЧН-12/14 по довжині і з плинном циклу визначено за газодинамічним методом. Використовувались:  $F_w$  – площа поверхні тепловіддачі за кресленнями;  $T, T_w$  – експериментальні дані зміни температури випускного газу і внутрішньої стінки колектора,  $M_e$  – масова витрата газу за розрахунком циклу КДВЗ;  $\delta\ell, dw, di$  – елементарні механічна робота, зміна швидкості й ентальпії газу

$$\alpha_w = \frac{M_e}{(T - T_w)F_w} \left( \frac{dw^2}{2} + \delta\ell + di \right). \quad (1)$$

Алгоритм машинної обробки табличних даних вмонтовувався у фізико-математичну модель КДВЗ [6]. Результати дослідження наведені у таблиці 1.

У таблиці позначено:

- $\varphi$  – кут повороту колінчастого валу,
- $\mu F_e$  – ефективна прохідна площа випускного клапанного органу,
- $F_w$  – площа поверхні тепловіддачі патрубку,
- $T_1, T_2, w_1, w_2$  – температура і швидкість випускного газу на вході у патрубок і на виході,
- $T, T_w$  – температура газу і поверхні тепловіддачі у середньому перерізі по довжині патрубку,
- $q_w, Q_w$  – поверхнева щільність теплового потоку і теплота, передана через поверхню,

**Таблиця 1** – Результати визначення коефіцієнта тепловіддачі в кришці циліндра дизеля 6ЧН-12/14

$\varphi$ °ПКВ	$\mu F_e$ мм <sup>2</sup>	$M_e$ кг/с	$w_1$ м/с	$T_1$ К	$w_2$ м/с	$T_2$ К	$T$ К	$T_w$ К	$\alpha_w$ Вт/м <sup>2</sup> ·К	$q_w$ Вт/м <sup>2</sup>	$F_w$ мм <sup>2</sup>	$Q_w$ Дж	$\alpha_{w,ср}$ Вт/м <sup>2</sup> ·К
0	23,6	0	0	813	0	773	793	875	0	0	21112	0	-4582
5	6,6	0,0006	141,96	793	0,58	753	773		3	-338		0,02	
10	0	0,0003	0	773	0,30	733	753		0	0		0	
495	0	0	0	1185	0	1000	1092,5		0	0		0	
510	40,6	0,0189	980,11	1149	22,66	994,6	1071,8		-2197	-432630		-18	
525	100,9	0,0548	1111,2	1113	65,56	989,3	1051,2		-9121	-1606975		-68	
540	300,6	0,1386	911,84	1077	164,80	984	1030,5		-17085	-2656840		-114	
555	445,2	0,1849	787,09	1032	210,66	942,6	987,3		-22616	-2540572		-111	
570	510,8	0,1861	660,58	987	202,76	901,3	944,2		-25496	-1763475		-78	
585	528,8	0,1711	559,92	942	177,88	860	901		-44647	-1160826		-51	
600	544,9	0,1443	449,23	923,3	147,98	848,3	885,8		-58071	-629108		-28	
615	549,3	0,1209	365,84	904,6	122,29	836,6	870,6		81046	-351199		-16	
630	538,7	0,1050	317,23	886	104,71	825	855,5		11862	-231323		-10	
645	523,9	0,0977	299,41	874	96,15	814	844		6247	-193674		-8,6	
660	498,4	0,0927	294,50	862	89,97	803	832,5		4228	-179695		-7,9	
675	406,6	0,0805	309,28	850	77,09	792	821		3279	-177110		-7,7	
690	246,3	0,0582	365,37	841	55,24	784,6	812,8	2962	-184153	-7,9			
705	102,6	0,0324	482,06	832	30,41	777,3	804,6	2554	-179668	-7,6			
720	23,6	0,0086	552,26	823	8,01	770	796,5	798	-62716	-2,6			

$\alpha_w, \alpha_{wcp}$  – коефіцієнт тепловіддачі: дійсна і середня величини.

Температури  $T_1, T_2, T, T_w$  у відповідних перерізах колектора визначались експериментально за допомогою термопар і термоанемометру. До монтажу термопар висуваються такі вимоги: спай розміщується безпосередньо в місці виміру температури, забезпечується надійний контакт спаю і тіла колектору, місце зварювання ретельно обробляється, щоб поверхня була ідентична вихідній, не утворився місцевий опір і не змінилася газодинамічна структура потоку.

Використовувались: термопара хромель-алюмель  $\varnothing 0,55$  мм з потенціометром ПП-63 як вторинним приладом; термоанемометричний вимірювальний комплекс ТАИК-1 з лінеаризатором ТЛ-1 і термоанемометрами ТА-15, де у якості чутливого елементу платиновий дріт  $\varnothing 15$  мкм. Виміри температури  $T_w$  реєструвалися 2-ма способами: а) на фотопапері шлейфовим осцилографом Н-145, б) запам'ятовуючим пристроєм ЕОМ після підготовки сигналу адаптером.

Значення кута повороту колінчастого валу  $j$ , при яких відбувалися виміри температури, фіксувалися за положенням верхньої мертвої точки у 1-му циліндрі на такті впуску. Задля цього на маховику монтувався ємкісний датчик, сигнал від якого відображено на папері разом з вимірами. Частоту обертання колінчастого валу встановлювалося за допомогою тахометру ТЕСА з первинним перетворювачем ППТ-26.

Таким самим чином встановлюються значення коефіцієнту тепловіддачі всіх елементів і власно самого випускного колектора (задля економії місця не наведено). Достовірність методики і алгоритму перевірено за співпадінням результатів з результатами обчислення за теплотехнічним методом, адекватність – за співпадінням з експериментальними даними, відомими з літератури.

### Висновки

Встановлено для випускного колектора КДВЗ: 1) коефіцієнт тепловіддачі залежить від витрати газу; 2) дійсні значення коефіцієнту тепловіддачі суттєво

відрізняються від наведених у літературі з двигунобудування і теплотехніки, середні значення відхиляються не більше, ніж на 7%; 3) при певних умовах напрямків теплового потоку може змінитись на протилежний.

Дійсні інструкції і правила обробки декількох сполучених функцій декількох загальних аргументів універсальні, їх можна застосовувати з неназваними тут характеристиками КДВЗ, при вирішенні задач не пов'язаних з двигунобудуванням. Програмне забезпечення НРНС, Massif, Fork, Interpol складене алгоритмічною мовою Fortran IV, відтестоване при дослідженні газодинамічних процесів у впускному і випускному трактах дизелів серії ЧН-12/14 показало високу швидкість і задовільну збіжність.

### Список літератури

1. Егоров Я. А. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания с учетом молекулярного изменения рабочего тела при сгорании / Егоров Я. А., Воропаев Е. П. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 2. – С. 150–153.
2. Дехович Д. А. Математическая модель характеристик КДВС с различными системами турбонаддува / Дехович Д. А., Перов К. Ю. // Двигателестроение. – Л.: ЛПИ. – 1988. – № 7. – С. 9–12.
3. Артюхов А. В. Методика расчета двумерного нестационарного течения газа в выпускной системе ДВС / А. В. Артюхов, В. В. Бравин, Ю. Н. Исаков // Двигателестроение. – Л.: ЛПИ. – 1985. – № 11. – С. 55–59.
4. Мазин В. О. Алгоритм пошуку вихідних даних фізико-математичної моделі комбінованого двигуна внутрішнього згорання / В. О. Мазин // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С. 142–143.
5. Егоров Я. А. Об аппроксимации некоторых экспериментальных зависимостей / Я. А. Егоров, В. А. Мазин; Запорожск. машиностроит. ин-т. – Киев, 1989. – 12 с. – рус. – Деп. в УкрНИИТИ 09.10.89, № 2189-Ук89.
6. Мазин В. О. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі випускного колектора КДВЗ / В. О. Мазин // Вісник Східно-Українського національного університету. – 2010. – № 6. – С. 196–201.

Одержано 06.03.2012

### Мазин В.А. Машинная обработка характеристик компрессора и турбины теплового двигателя и агрегата наддува комбинированного ДВС

*Составлен алгоритм машинной обработки двух функций двух общих аргументов. Показал высокое быстродействие и удовлетворительную сходимость при исследовании газодинамических процессов во впускной и выпускной системах. Отличается универсальностью: ориентирован на КДВС, может применяться при решении задач, не связанных с двигателестроением.*

**Ключевые слова:** тепловой двигатель, комбинированный двигатель внутреннего сгорания, агрегат наддува, газодинамические процессы, машинная обработка характеристики компрессора, машиноориентированный алгоритм.

### Mazin V. Machining of compressor and thermal engine turbine and the pressurisation unit of combined internal combustion engine characteristics

*The algorithm of two functions of two general arguments machining is given. High speed and satisfactory convergence at gas dynamics processes in inlet and final systems research was shown. It is universal as focused at CICE, and can be applied for the decision of the problems not connected with enginebuilding.*

**Key words:** combined internal combustion engine, pressurisation unit, gas dynamics processes, machining of compressor characteristics, machining algorithm.