

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 622.691.4.052.012

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ЕКОЛОГО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ПОКАЗНИКАМИ ЙОГО РОБОТИ

М. І. Горбійчук, І. В. Щупак

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,
15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (0342) 504521, e-mail: gorb@nung.edu.ua*

За результатами спостережень за роботою газотурбінного двигуна отримана емпірична модель оптимальної структури, яка відображає взаємозв'язок між його еколого-технічними характеристиками з показниками його роботи, що є важливою задачею при визначенні технічного стану ГПА. Наявність таких моделей відкриває шляхи до вибору таких режимних параметрів, які забезпечили б мінімізацію викидів в атмосферу шкідливих речовин при заданих обсягах перекачки природного газу.

Ключові слова: газотурбінний двигун, еколого-технічні характеристики, показники роботи, модель, генетичний алгоритм.

По результатам наблюдений за работой газотурбинного двигателя получена эмпирическая модель оптимальной структуры, которая отображает взаимосвязь между его эколого-техническими характеристиками и показателями его работы, которые являются важной задачей при определении технического состояния ГПА. Наличие таких моделей открывает пути к выбору таких режимных параметров, которые обеспечили бы минимизацию выбросов в атмосферу вредных веществ при заданных объемах перекачки природного газа.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, эколого-технические характеристики, показатели работы, модель, генетический алгоритм.

On results looking after work of turbo-engine the empiric model of optimum structure, which represents intercommunication between his ecological descriptions and indexes his works which are an important task at determination of the technical state of GPA, is got. The presence of such models opens ways to the choice of such regime parameters which would provide minimization of extrass in the atmosphere of harmful matters at the set volumes of pumping over of natural gas.

Keywords: turbo-engine, ecological descriptions, indexes of work, model, genetic algorithm.

Україна має потужну та розвинуту мережу транспортування газу від східних кордонів до країн Центральної та Західної Європи. Газотранспортна мережа (ГТМ) України включає [1] близько 35 тис. км газопроводів, 71 компресорну станцію (КС) загальною потужністю 5,4 млн. кВт. У переважній більшості випадків на КС встановлені газоперекачувальні агрегати (ГПА) з газотурбінним двигуном (ГТД), енергоносієм для яких є транспортований газ. На привід ГПА витрачається 0,5 – 1,5 % від обсягу транспортованого газу [2]. У 2009 р. через ГТМ України було прокачано близько 94 куб. млрд. природного газу. У поточному році цей

показник повинен зрости на 15 %. При цьому витрати природного газу на технологічні потреби зростуть до 1,65 млрд. м³. Спалювання такої кількості газу погіршує екологічну ситуацію навколишнього середовища.

Проблемам впливу промислових об'єктів на екологію довікля присвячена низка робіт таких вчених, як Адаменка О.М., Горленка І.О., Шевченка Л. М., Барановського В. А., Міщенко Л.В., Пендерецького О.В. та ін., в яких розглянуті такі питання, як моніторинг довікля, визначення граничнодопустимих концентрацій шкідливих елементів, просторовий розподіл техногенного забруднення тощо.

Аналіз літературних джерел показує, що практично відсутні роботи з дослідження взаємозв'язку технічного стану ГПА з вмістом забруднюючих речовин у відхідних газах. Метою даної роботи є побудова емпіричної моделі функціонального зв'язку між технічним станом ГПА і його екологічними характеристиками для оперативного контролю і прогнозування вмісту забруднюючих речовин у відхідних газах. Актуальність роботи підсилює ще той факт, що на сьогоднішній день на ГПА не здійснюється поточний і неперервний контролю вмісту шкідливих речовин у відхідних газах.

Викиди забруднюючих речовин (ЗР), які контролюють [3], це оксиди азоту NO_x (NO , NO_2), окису вуглецю CO і діоксину сірки SO_2 (за наявності). Засобами вимірювання концентрацій ЗР є прилад TESTO – 350 або інші, які мають аналогічні метрологічні характеристики.

На виході ГТД вимірюють такі параметри, як:

– об'ємні концентрації оксидів азоту NO_x , окису вуглецю CO та діоксину сірки SO_2 ;

– об'ємну концентрацію кисню O_2 ;

– коефіцієнт розбавлення сухих продуктів згорання;

– температуру продуктів згорання.

За результатами вимірювань і розрахунків визначають наступні екологічні характеристики [3]:

– об'ємні та масові концентрації оксидів азоту NO_x і окису вуглецю CO ,

– потужності викидів оксидів азоту і окису вуглецю,

– питомі (на одиницю витрати тепла) викидів оксидів азоту і окису вуглецю у відпрацьованих газах ГТД.

Як приклад, у табл. 1 наведені результати екологічних обстежень ГПА типу ГТ – 750 – 6 станції № 7 КС «Лубенська», які проводились 10.05.2005 р. Відмітимо, що експериментальні дослідження проводились з 10.05.2005 р. по 24.09.2008 р., а табл. 1 лише частково відтворює отримані дані.

Результати експерименту дають змогу обчислити [3] масові концентрації оксидів азоту та вуглецю:

$$C_{NO_x} = 2,05(\hat{C}_{NO_2} + \hat{C}_{NO}), \quad (1)$$

$$C_{CO} = 1,25\hat{C}_{CO}, \quad (2)$$

де \hat{C}_{NO_2} , \hat{C}_{NO} , \hat{C}_{CO} – виміряні об'ємні концентрації оксиду та діоксину азоту NO , NO_2 та оксиду вуглецю CO , ppm.

Таблиця 1 – Еколого-технічні характеристики ГПА (концентрація в продуктах згорання)

Найменування параметрів	Розмірність	Режими		
		1	2	3
Витрата паливного газу	нм ³ /год	2117	1978	1759
NO_2	мг/нм ³	3,081	2,054	2,054
NO	мг/нм ³	68,809	37,999	32,864
CO	мг/нм ³	58,125	105,625	153,75
NO_x	мг/нм ³	71,89	40,053	34,918

За визначеними значеннями \tilde{N}_{NO_x} і C_{CO} , згідно формул (1) і (2), знаходять відповідні їм концентрації, що приведені до умовної п'ятнадцяти-процентної концентрації кисню у сухих продуктах згорання:

$$C_{NO_x}^{15} = \alpha C_{NO_x} / 3,5, \quad (3)$$

$$C_{CO}^{15} = \alpha C_{CO} / 3,5, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт розбавлення сухих продуктів згорання, який визначають за показами газоаналізатора.

Потужність викидів оксидів азоту та оксидів вуглецю визначають за знайденими значеннями $C_{NO_x}^{15}$ і C_{CO}^{15} , використовуючи наступні формули:

$$M_{NO_x} = C_{NO_x} K Q_a \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

$$M_{NO} = C_{CO} K Q_a \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

де $K = \frac{\beta - 0,105}{\beta + 0,105}$ – коефіцієнт співвідношення

об'ємних витрат сухих і вологих продуктів згорання; $\beta = 0,895\alpha + 0,105$ – коефіцієнт надлишку повітря.

Питомий викид на одиницю витрати тепла у ГТД оксидів азоту та вуглецю визначають наступним чином:

$$m_{NO_x}^Q = \frac{M_{NO_x}}{Q}, \quad (7)$$

$$m_{CO}^Q = \frac{M_{CO}}{Q}, \quad (8)$$

де Q – витрати тепла за одиницю часу в ГТД, $MВт$.

Використавши дані, які наведені у табл. 1, за формулами (1) – (8) визначенні еколого-технічні характеристики ГПА – 750 – б (табл. 2).

На стан навколишнього середовища впливає не скільки концентрація оксиди азоту NO_2 , оксиду вуглецю у продуктах згорання, як потужність їх викидів в атмосферу, які, очевидно, залежать від кількості спалюваного природного газу і від технічного стану ГТД.

Технічний стан ГТД будемо характеризувати його коефіцієнтом корисної дії (к.к.д.) η . Тоді

$$M_i = f_i(q, \eta), \quad i = \overline{1,4}, \quad (9)$$

де $M_1 = M_{NO_x}$; $M_2 = M_{CO}$; $M_3 = M_{NO}$; $M_4 = M_{NO_2}$; q – витрата паливного газу за нормальних умов.

К. к. д. ГТД визначався методом енергетичних балансів за методикою, яка наведена у [3, 4]. Результати таких розрахунків також приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати обробки даних спостережень

Найменування параметрів	Розмірність	Режими		
		1	2	3
Витрата паливного газу	нм ³ /год	2117	1978	1759
Коефіцієнт корисної дії ГТД	-	0,270	0,266	0,251
Приведена концентрація у продуктах згорання (O_2 - 15 %)				
NO_2	мг/нм ³	7,300	5,135	5,480
NO	мг/нм ³	161,918	94,997	87,681
CO	мг/нм ³	136,788	264,062	410,203
NO_x	мг/нм ³	169,218	100,132	93,161
Потужність викиду				
NO_2	г/с	0,1324	0,0867	0,0840
NO	г/с	2,9568	1,6037	1,3433
CO	г/с	2,4377	4,4578	6,2644
NO_x	г/с	3,0892	1,6904	1,4272

Емпіричну модель (9) будемо шукати у вигляді полінома степені n виду

$$y = \sum_{i=0}^{Z-1} a_i \prod_{j=1}^n x_j^{s_{ji}}, \quad (10)$$

де y - одне із значень M_i , $i = \overline{1,4}$; x_j , $j = 1, 2$ - відповідно $x_1 = q$, $x_2 = \eta$; Z - кількість членів полінома; a_i - коефіцієнти полінома; s_{ji} - степені аргументів, які повинні задовольняти обмеженню $\sum_{j=1}^n s_{ji} \leq m$.

Число членів Z полінома (10) визначають за такою формулою [5]: $Z = \frac{(m+n)!}{m!n!}$.

В основі емпіричного моделювання процесів і явищ лежить фундаментальний метод найменших квадратів (МНК). У МНК допускають, що структура моделі відома, яку в більшості випадків вибирають лінійною відносно її параметрів.

На практиці, як правило, структура моделі (9) невідома, що приводить до необхідності довільного вибору як числа функцій, так і вигляду самих функцій у моделі (9). Якщо вибрана модель у вигляді полінома (10), то задача синтезу структури моделі зводиться до вибору степені полінома і до вибору кількості членів такого полінома. Іншими словами, після того, як вибрана степінь полінома необхідно визначити які члени у поліноміальній залежності (10) слід залишити, а які не включати до складу полінома. Критерій, який використовується для визначення параметрів моделі (10), є внутрішнім критерієм [6] і його використання приводить до помилкового правила: чим складніша модель, тим вона точніша. Складність поліноміальної моделі визначається числом членів і найвищою степеню полінома: чим більше членів полінома, тим менше значення критерію апроксимації.

Тому для вибору структури моделі (10) був запропонований індуктивний метод самоорганізації моделей [6], ідейну сторону якого визначає теорема Геделя. У відповідності з цією теоремою ніяка система аксіом не може бути логічно замкнутою: завжди можна знайти таку теорему, для доведення якої необхідне зовнішнє доповнення – розширення початкової системи аксіом. Стосовно задачі визначення структури моделі (10) геделівський підхід означає застосування зовнішнього критерію, який дає можливість однозначного вибору єдиної моделі із заданого класу моделей. Критерій називають зовнішнім, якщо його визначення засновано на застосуванні нових

даних, які не використовувались при синтезі моделі (10). Це означає, що всі дані кількістю N , які отримані у результаті експерименту, розбиваються на дві частини N_A і N_B так, щоб $N = N_A + N_B$. Перша із них – навчальна, а друга – перевірна.

У більшості випадків для вибору структури моделі використовують критерій регулярності

$$\Delta^2(B) = \sum_{i=1}^{N_B} (Y_i - y_i)^2 / \sum_{i=1}^{N_B} Y_i^2, \quad (11)$$

де Y_i, y_i – експериментальні і розрахункові значення однієї із концентрацій на множині точок B ; і мінімуму зміщення

$$\Delta^2(A, B) = \sum_{i=1}^N (y_i(A) - y_i(B))^2 / \sum_{i=1}^N Y_i^2, \quad (12)$$

де $y_i(A), y_i(B)$ – розрахункові значення однієї із концентрацій за формулою (10) відповідно на множинах точок A і B .

Якщо вибраний критерій регулярності (11), то вибирають наступний розподіл даних експерименту [6]: $N_A = 0,7N$ і $N_B = 0,3N$, а при виборі критерію (12): $N_A = 0,5N$ і $N_B = 0,5N$.

Реалізація індуктивного методу самоорганізації моделей здійснюється поетапно: перший етап – генерація моделей-претендентів (у певному порядку підвищення складності); другий етап – відбір найкращої моделі за критерієм селекції (11) або (12).

Із відомих трьох способів генерації модулів-претендентів найпривабливішим є комбінаторний метод, оскільки він дає можливість отримати модель, де аргументами виступають вхідні величини системи. Для зняття проблеми великої розмірності застосуємо генетичний підхід [7].

Утворимо упорядковану структуру довжиною M , в якій на i -му місці буде стояти одиниця або нуль в залежності від того чи параметр $a_i, i = 1, M$, моделі (10) відмінний від нуля, чи нульовий. У теорії генетичних алгоритмів така упорядкована послідовність носить назву хромосоми або особи, а атомарний елемент хромосоми (одиниця або нуль) – це ген. Набір хромосом утворює популяцію. Важливим поняттям у теорії генетичних алгоритмів є функція пристосування, яка визначає ступінь пристосування окремих осіб у популяції. Вона

дає змогу із всієї популяції вибрати особи, які є найбільш пристосованими, тобто такі, які мають найбільше (найменше) значення функції пристосування. У задачі синтезу емпіричних моделей функцією пристосованості виступає критерій селекції (11) або (12).

Таким чином, задачу синтезу емпіричної моделі сформуємо наступним чином: із початкової популяції хромосом шляхом еволюційного відбору вибрати таку хромосому, яка забезпечує найкраще значення функції пристосування (мінімальне значення критерію селекції (11) або (12)).

Використовуючи методику роботи [7], у середовищі MatLab синтезована програма, яка дала змогу отримати емпіричні моделі (9) у вигляді полінома (10).

Як приклад застосування розробленої методики синтезуємо емпіричну модель потужності викидів CO в залежності від q і η . Були вибрані такі параметри програми: степінь полінома $n = 5$, ймовірність схрещування $p_c = 0,8$, ймовірність мутації $p_m = 0,01$. Як критерій селекції був вибраний критерій регулярності (10). Для підвищення точності моделі змінні M_2 приведені до безрозмірного виду:

$$y_j = \frac{M_2^{(i)} - M_{2,min}}{M_{2,max} - M_{2,min}},$$

$$x_j^{(i)} = \frac{X_j^{(i)} - X_{j,min}^{(i)}}{X_{j,max}^{(i)} - X_{j,min}^{(i)}}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (13)$$

де $X_j, j = 1, 2$ - одна із величин q, η .

У результаті емпіричного моделювання з використанням генетичного алгоритму отриманий наступний результат:

$$y = a_4 x_1 x_2 + a_7 x_1^2 x_2 + a_9 x_2^3 + a_{10} x_1^4 + a_{11} x_1^3 x_2 + a_{14} x_2^4 + a_{16} x_1^4 x_2 + a_{17} x_1^3 x_2^2, \quad (14)$$

де $a_4 = 0,054497$; $a_7 = -3,961040$; $a_9 = 6,894064$; $a_{10} = 2,914598$; $a_{11} = -6,634259$; $a_{14} = -5,255779$; $a_{16} = -0,350410$; $a_{17} = 6,578187$.

Результат синтезу моделі (14) відтворює рис. 1, на якому позначкою «0» позначені експериментальні дані, а позначкою «+» - розрахункові дані, які отримані за формулою (14). Перехід від безрозмірних одиниць до розмірних здійснювався у відповідності з (13), тобто

$$M_2^{(i)} = y_i (M_{2,max} - M_{2,min}) + M_{2,min}.$$

Адекватність моделі (14) перевірялась за допомогою коефіцієнта кореляції K_{Yy} між експериментальними $Y_i = M_2^{(i)}$ та розрахунковими за формулою (14) значеннями y_i . Було отримано, що $K_{Yy} = 0,998$, що свідчить про високу степінь кореляції між величинами Y_i і y_i .

Аналогічним чином отримані емпіричні залежності (9) і для значень M_1 , M_3 і M_4 . Результати відповідних розрахунків приведені в табл. 3.

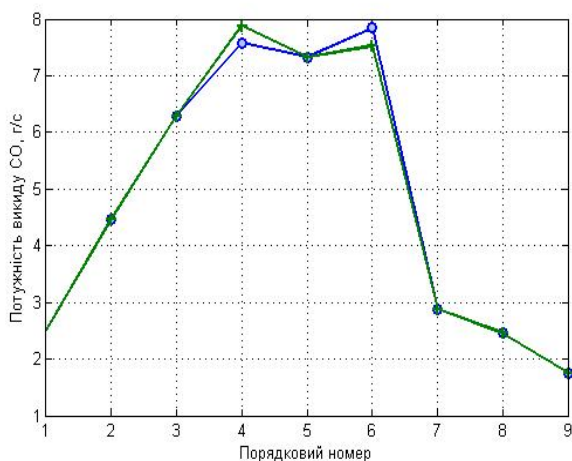


Рисунок 1 – Залежність потужності викиду CO від витрати паливного газу q та к.к.д. η ГТД

З урахуванням ненульових значень коефіцієнтів (табл. 3) отримуємо наступні емпіричні моделі:

- для NO_2

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_1x_2 + a_6x_1^3 + a_7x_1^2x_2 + a_8x_1x_2^2 + a_9x_2^2 + a_{11}x_1^3x_2 + a_{15}x_1^5 + a_{19}x_1x_2^4 + a_{21}x_1^6 + a_{23}x_1^4x_2^2;$$

- для NO

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_4x_1x_2 + a_5x_2^2 + a_8x_1x_2^2 + a_{11}x_1^3x_2 + a_{13}x_1x_2^3 + a_{16}x_1^4x_2 + a_{18}x_1^2x_2^3 + a_{19}x_1x_2^4 + a_{20}x_2^5;$$

- для NO_x

$$y = a_1x_1 + a_7x_1^2x_2 + a_8x_1x_2^2 + a_9x_2^3 + a_{12}x_1^2x_2^2 + a_{14}x_2^4 + a_{15}x_1^5 + a_{16}x_1^4x_2 + a_{17}x_1^3x_2^2.$$

Таблиця 3 – Результати синтезу емпіричних моделей

Коефіцієнти моделі	Продукти згорання		
	NO_2	NO	NO_x
a_0	-0.451259	0	0
a_1	-4.364695	0.340793	-3.618547
a_2	4.647240	3.202716	0
a_3	-2.747308	0	0
a_4	-16.861487	13.014878	0
a_5	0	-11.233460	0
a_6	20.740812	0	0
a_7	8.813632	0	-10.752948
a_8	13.867551	-0.341907	27.861778
a_9	0.725737	0	4.547125
a_{10}	0	0	0
a_{11}	12.272484	-68.057844	0
a_{12}	0	0	-7.786252
a_{13}	0	17.143897	0
a_{14}	0	0	-16.420172
a_{15}	-6.721039	0	11.826830
a_{16}	0	52.845180	-34.720682
a_{17}	0	0	30.120748
a_{18}	0	-27.893858	0
a_{19}	-15.958572	39.217906	0
a_{20}	0	-15.629103	0
a_{21}	-10.600914	-	-
a_{22}	0	-	-
a_{23}	-5.290232	-	-

Коефіцієнти кореляції між результатами промислових даних і розрахунковими величинами (табл. 3) є такими:

- для моделі NO_2 : 1,0000,
- для моделі NO : 0.98756,
- для моделі NO_x : 1,0000.

Як приклад, на рис. 2 показана зміна потужності викидів CO у функції від q і η .

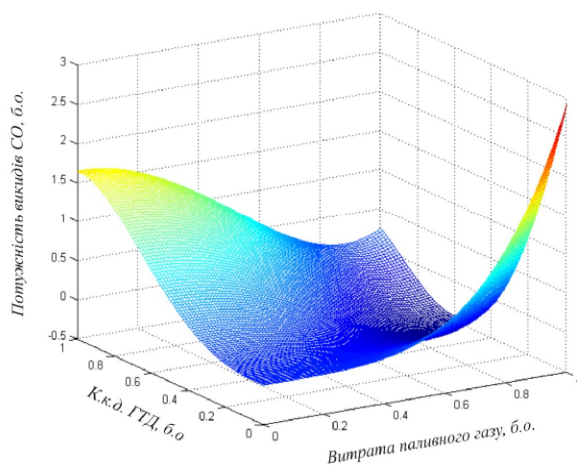


Рисунок 2 – Залежність потужності витрати CO від параметрів ГТД η і q

ВИСНОВКИ

Отримані емпіричні моделі взаємозв'язку техніко-екологічних параметрів з витратою паливного газу і к. к. д. ГТД на засадах генетичних алгоритмів дають змогу прогнозувати потужності викидів оксидів азоту NO_x (NO , NO_2) та окису вуглецю CO , що є актуальною задачею при визначенні технічного стану ГПА. Наявність таких моделей відкриває шляхи до вибору таких режимних параметрів, які забезпечили б мінімізацію викидів в атмосферу шкідливих речовин при заданих обсягах перекачки природного газу.

1. Говдяк Р. М. Стан і напрямки розвитку трубопровідного транспорту газу в Україні / Р. М. Говдяк, А. А. Руднік // *Нафта і газ України. Збірник наукових праць. Матеріали 6-ї Міжнародної наукової конференції.* - Івано-Франківськ, 31 жовтня – 3 листопада, 2000р., том 1. С.38 - 41. 2. *Трубопровідний транспорт газу: монографія* / М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін.; за ред. М. П. Ковалко. – К.: АренаЕко, 2002. – 600 с. 3. *Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів: СОУ 60.03-30019801-011:2004.* – Офіц. вид. – К.: ДК «Укртрансгаз», 2004. – 117 с. 4. Горбійчук М. І. Вплив факторів роботи газоперекачувальних агрегатів на час їх напруження / М. І. Горбійчук, Б. В. Копей, А. Беллауар, І. В. Щупак // *Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково-технічний журнал.* – 2008. - № 3 (8). – С. 55 – 58. 5. Горбійчук М. І. Індуктивний метод побудови математичних моделей газоперекачувальних агрегатів природного газу / М. І. Горбійчук, М. І. Козуляк, Я. І. Заячук // *Нафтова і газова промисловість.* – 2008. - № 5. – С. 32 – 35. 6. Ивахненко А. Г. *Індуктивний метод самоорганізації моделей складних систем* / А. Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с. 7. Горбійчук М. І. *Метод синтезу емпіричних моделей на засадах генетичних алгоритмів* / М. І. Горбійчук, М. І. Козуляк, О. Б. Василенко, І. В. Щупак // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* – 2009. – № 4 (33). – С. 72-79.

Поступила в редакцію 05.04.2010р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М.