

Літусенко С.О.¹, Максимук Г.Є.²

¹Херсонська державна морська академія

²Херсонський національний технічний університет, Україна

НАБЛИЖЕННЯ ПОЛІТРОПНИХ КРИВИХ

Постановка проблеми. Як відомо, індикаторні діаграми дозволяють оцінювати якість процесів, які складають робочий цикл двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Аналітичний опис їх складових ланок за експериментальними залежностями традиційно використовує спрощені моделі [1]. Сучасні системи комп'ютерної математики дозволяють виконувати апроксимацію експериментальних даних суттєво нелінійними залежностями, які більш точно описують реальні фізичні та хімічні процеси, які відбуваються під час робочих циклів ДВЗ. Тому розробка спеціалізованих програмних модулів для аналізу індикаторних діаграм є актуальною задачею для підвищення якості наукових досліджень вказаного спрямування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статтях [2–4] для моделювання тиску в циліндрах двигунів на лінії стиснення використовуються політропні залежності зі сталими показниками степенів. У роботі [2] для моделювання аналітичної залежності тиску від кута повороту колінчастого валу залучаються також функції Вібе, але відносна похибка наближення на ділянках, які відповідають періоду відкриття випускного клапану і продувочних вікон малообертового двигуна (МОД) із прямоточно-клапанною продувкою, а також в околі точки початку видимого горіння сягає 40 %, що не можна визнати задовільним результатом апроксимації.

Ціль публікації. Ціллю публікації є дослідження можливостей функції DataFit, яка належить до спеціалізованого пакету методів нелінійної оптимізації DirectSearch, що сумісний з математичним процесором Maple, стосовно

можливостей відновлення параметрів політропної кривої зі змінним показником степеня на лінії стиснення відкритої індикаторної діаграми.

Основна частина. В публікації [1] відзначається, що реальний процес стиснення описується політропною кривою зі змінним показником, який для суднових дизельних двигунів змінюється від значення 1,5 на початку стиснення до значення 1,1 у верхній «мертвій» точці (ВМТ). У першому наближенні будемо вважати, що показник степеня політропи стиснення $n(\alpha)$ змінюється за лінійним законом:

$$n(\alpha) = n_1 V(\alpha) + n_2, \quad (1)$$

де $n_1, n_2 \in R$ – шукані параметри; α – кут повороту колінчастого валу;

$$V(\alpha) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} \cdot r \cdot \sigma(\alpha), \quad (2)$$

де V_c – об'єм камери згоряння; D – діаметр циліндра; r – радіус кривошипу.

Функція $\sigma(\alpha)$ є кінематичною функцією ходу поршня. Наведемо її у скоригованому вигляді, який забезпечує відповідність верхньої «мертвої» точки індикаторної діаграми куту повороту колінчастого валу $\alpha = \pi$:

$$\sigma(\alpha) = \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) - \left(\cos(\alpha - \pi) + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2(\alpha - \pi)}\right). \quad (3)$$

Очевидно, що функція (3) може бути спрощена за допомогою формул зведення.

Будемо визначати на лінії стиснення залежність тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу за формулою:

$$P(\alpha) = p_c \left(\frac{V_c}{V(\alpha)} \right)^{n(\alpha)}, \quad (4)$$

де p_c – тиск у циліндрі в кінці процесу стиснення.

Таким чином, функція (4) з врахуванням залежностей (1–3) є суттєво нелінійною.

Функція DataFit пакету DirectSearch призначена для знаходження параметрів функції, за допомогою якої виконується апроксимація експериментальних даних [5]. Апроксимація може бути виконана одним із восьми методів, які відрізняються функціями для оцінки точності виконаного наближення. Для розв’язання власно задач мінімізації похибки наближення застосовується метод лінійного пошуку CDOS (Conjugate Direction with Orthogonal Shift), який використовує спряжені напрямки з ортогональним зсувом.

Для прикладу наведемо результати апроксимації описаним вище способом лінії стиснення індикаторної діаграми, яка запозичена з монографії [6, С. 17]. Наведений графік оцифрований за допомогою програми Graph2Digit [7].

Початкові значення параметрів функції (4) запозичені з роботи [8]. Вибір початкових наближень обумовлений збігом моделі двигуна, який досліджується в роботах [6] та [8]. А саме, досліджується судновий МОД моделі 12K98МС виробництва фірми MAN B&W.

Для підвищення точності апроксимації прологарифмуємо залежність (4) та, відповідно, експериментальні значення тиску. На рис. 1 показані результати апроксимації експериментальної залежності функцією виду (4) за допомогою методу найменших модулів. Цей метод є більш стійким до великих відхилень експериментальних даних, ніж традиційний метод найменших квадратів. Із рис. 2 очевидно, що відносна похибка наближення не перевищує 1,9 %.

Аналогічна точність апроксимації досягається при використанні інших методів, які входять до бібліотеки методів функції DataFit пакету DirectSearch.

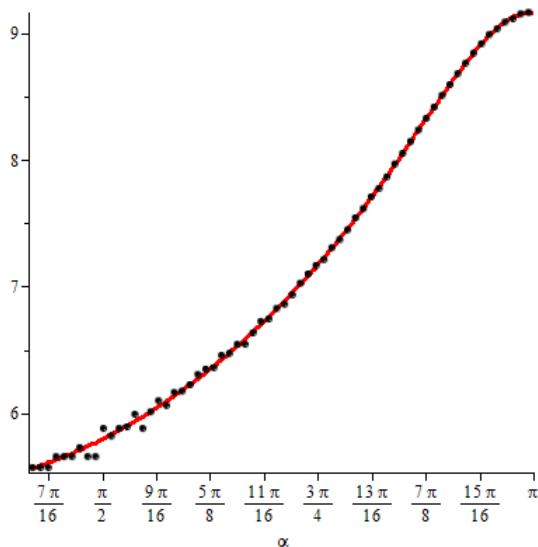


Рисунок 1 – Експериментальна та аналітична залежності $\ln P(\alpha)$

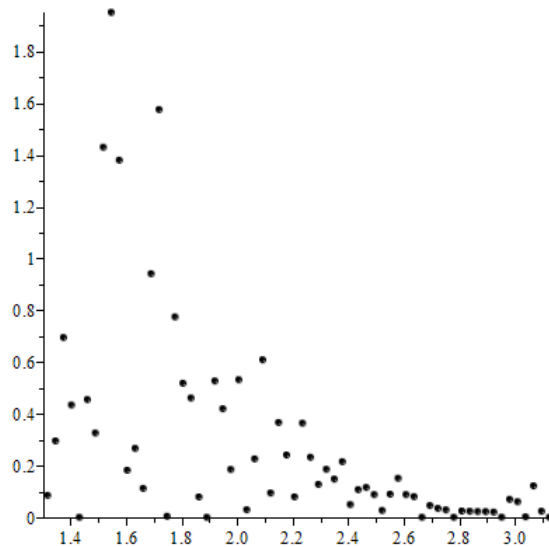


Рисунок 2 – Відносні похибки апроксимації (%) в експериментальних точках кута повороту колінчастого валу α

Висновки. Очевидно, що використання сучасних спеціалізованих пакетів для обробки експериментальних даних дозволяє якісно проводити апроксимацію нелінійних залежностей. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою програмного модуля, який дозволяє наближувати криву відкритої індикаторної діаграми на всьому проміжку кута обертання колінчастого валу.

Література

1. Возницкий, И. В., & Пунда, А. С. (2008). Судовые двигатели внутреннего сгорания. Т. 2. М.: МОРКНИГА.
2. Piedrahita, C. A. R., Riaza, H. F. Q. (2003). Prediction of In-Cylinder Pressure, Temperature, and Loads Related to the Crank Slider Mechanism of I. C. Engines:

A Computational Model. *SAE Technical Paper*, 2003-01-0728. DOI: 10.4271/2003-01-0728

3. Kamaltdinov, V.G., Lysov, I.O., & Nikiforov, S. S. (2015). DIESEL ENGINE OPERATING CYCLE OPTIMIZATION with SIMULATION of COMBUSTION PROCESS by DOUBLE-WIEBE FUNCTION. *Procedia Engineering*, **129**, 873–878.
4. Haosheng Shen H., Jundong Zhang, Baicheng Yang and Baozhu Jia (2020). Development of a Marine Two-Stroke Diesel Engine MVEM with In-Cylinder Pressure Trace Predictive Capability and a Novel Compressor Model. *Journal of Marine Science Engineering*. **8**, 204, 33 p. DOI:10.3390/jmse8030204
5. Моисеев, С. Н. (2011). Универсальный метод оптимизации без использования производных с квадратичной сходимостью. Воронеж. Retrieved from the: <http://www.twirpx.com/file/1534928/>
6. Johnsson, J.-H. M., Saldh, J. (2018). Analysing the Effects Variable Injection and Exhaust Valve Timing Have on a Two-Stroke Diesel Engine. Gothenburg: Chalmers University OF Technology.
7. Graph2Digit 0.7.1b. Retrieved from the: <http://plsoft.su/digitizer.html>
8. Савчук В. П., Белоусов Е. В., Самарин А. Е., Симагин А. Ф. (2018). Обеспечение надежности головных подшипников судовых малооборотных двигателей, работающих на режимах частичных нагрузок. *Вестник двигателестроения*. **2**, 21–27.