

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ПНЕВМОДВИГУНА

Філатова Г. Є.¹, Нікітченко І. М.², Тесленко Е. В.², Стрілець М. В.², Савич Д. В.²

¹Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут» (НТУ "ХПІ")

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті з використанням комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB проведено повний факторний експеримент для оптимізації робочого процесу пневматичного двигуна, під час якого здійснено аналіз впливу незалежних параметрів (кутів відкриття-закриття клапанів) на його питому індикаторну витрату повітря. Під час експерименту отримано рівняння регресії другого порядку та визначено фактори та їхні взаємопоєднання, що впливають на параметр відгуку.

Ключові слова: факторний експеримент, пневматичний двигун, рівняння регресії, впускний та випускний клапани.

Вступ

Сучасний автомобільний пневматичний двигун (ПД) є складною динамічною системою з взаємопов'язаним впливом механічних, газодинамічних і теплофізичних процесів, що здійснюються в його елементах, вузлах, агрегатах і системах двигуна.

Безвідмовність і технічно ресурс системи повітропостачання (СП) є однією з головних складових надійності будь-якої енергетичної пневматичної установки, оскільки ця система забезпечує роботу ПД на будь-яких режимах експлуатації.

Питання дослідження процесу функціонування СП ПД полягають у вирішенні двох основних взаємопов'язаних завдань – аналізу та забезпечення (синтезу) необхідного рівня економічності ПД, що досягається за допомогою відповідних математичних методів.

Вирішення цього завдання пов'язане з великими труднощами, тому що ймовірність економічної роботи ПД залежить від безлічі факторів, зокрема від факторів робочого середовища (тиск стисненого повітря, склад повітря), конструктивних, експлуатаційних, режимних факторів тощо.

Завдання ускладнюється ще й тим, що вплив багатьох факторів на вихідну функцію є неоднозначним, і водночас на неї досить істотно впливають парні та потрійні кореляції.

Аналіз публікацій

Аналіз літератури продемонстрував [1–7], що велика кількість закордонних фірм, які використовують переваги пневмодвигуна, здійснюють процеси, що підвищують його ефективні показники.

Найбільш суттєво можна зменшити витрату повітря завдяки застосуванню клапанної системи повітрярозподілу зі змінними фазами та підігрівом стисненого повітря на впуску.

Однак вибір фаз газорозподілу є досить складним завданням.

Крім застосування математичного моделювання, виникає необхідність в експериментальній перевірці результатів дослідження. Застосування факторного експерименту дозволить скоротити кількість перевірок та час експерименту.

Мета і постановка завдання

Наявні способи вирішення цієї проблеми не дають можливості здійснити точний розрахунок в аналітичному вигляді. Однак якщо скористатися методами екстремального планування експерименту, тобто подати досліджуваній об'єкт як «чорний ящик», можна з достатнім ступенем точності отримати залежність імовірності безвідмовності роботи ПД від факторів, що на неї впливають.

Метою роботи є проведення повного факторного експерименту (ПФЕ).

Завдання роботи: на підставі аналізу літератури з огляду на варійовані фактори вибрати план проведення експерименту та побудувати графічні залежності впливу факторів (кутів відкриття-закриття впускних клапанів) на питому ефективну витрату стисненого повітря в ПД і визначити їхній вплив на індикаторну витрату повітря.

Виклад основного матеріалу

У роботі був використаний центральний композиційний рототабельний план другого порядку, запропонований Box і Behnken [8].

Попередньо для зменшення кількості експериментів методом Plackett and Burman [9] було проведено відсіювання малозначних факторів. Їх варіювали на трьох рівнях.

Кожен із дослідів проводився згідно з планом поєднання вибраних змінних X_1 , X_2 , X_3 , X_4 факторів:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4), \quad (1)$$

де X_1 – момент відкриття впускного клапана $\varphi_{\text{вп}}$ (10, 0, 10° пкв); X_2 – момент закриття впускного клапана $\varphi_{\text{вп}}$ (160, 170, 180° пкв); X_3 – момент відкриття випускного клапана $\varphi_{\text{вп}}$ (170, 180, 190° пкв); X_4 – момент закриття випускного клапана $\varphi_{\text{вп}}$ (270, 280, 290° пкв).

Для аналізу взаємовпливу трьох чинників знадобиться проведення 18 експериментів. У цьому випадку, крім парних, будуть враховані і всі інші види кореляцій.

Функцією виходу в ПФЕ є ймовірність мінімізації питомої ефективної витрати стисненого повітря ПД, що враховує зміну його якості в процесі експлуатації ПС [10].

Головною вимогою до моделі є здатність передбачати напрям подальших дослідів саме з необхідною точністю.

У цьому випадку експеримент можна провести як у реальному об'єкті, так і з його математичною моделлю [11, 12, 13].

У теорії планування експерименту сформовані вимоги та умови, які мають враховуватися під час вибору залежних (відгуків, виходів, функцій мети) та незалежних змінних. Залежна змінна має бути єдиною й однозначною, мати точний фізичний зміст, визначатися числом.

Таким чином, необхідно за допомогою експерименту, який проводитиметься за умови невідомих значень механізмів явищ, побудувати математичну модель, яка зв'яже питому ефективну витрату повітря g_i , що визначається виразом (2), з усіма змінними (факторами), від яких вона залежить.

Відповідно до вибраного плану було проведено та рандомізовано в часі 18 дослідів. Кожен з них повторювався 3 рази, для цього була використана імітаційна математична модель функціонування ПД з урахуванням сталості якості параметрів стисненого повітря, реалізована в програмному продукті MATLAB.

Математична модель після реалізації дослідів ПФЕ має такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_1x_1 - b_2x_2 - b_3x_3 - b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 - b_{13}x_1x_3 - b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{23}x_2x_4 - b_{34}x_3x_4, \quad (2)$$

де y – функція виходу; $x_i, x_j, \dots, x_n$ – фактори керування; $b_i, b_j, \dots, b_n$ – коефіцієнти регресії.

Для розрахунку коефіцієнтів цієї моделі було побудовано розширену матрицю планування та результатів експерименту (табл. 1).

Розглядаючи отриману поліноміальну модель (3), можна на підставі деяких математичних критеріїв аналізу досить чітко визначити її адекватність або неадекватність відносно до процесів, що реально відбуваються.

Подібна модель дозволяє визначити, наскільки великий вплив окремих факторів на систему, а також їхній взаємовплив. Коефіцієнти регресії розраховували за формулою

$$b_0 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \bar{y}_j; \\ b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j. \quad (3)$$

Після реалізації тривірневої чотирифакторної моделі ПФЕ та визначення статистичного значення кожного з 15 коефіцієнтів рівняння регресії (4) можна записати так:

$$y = 9782,53196 + 0,25999 x_1^2 + 0,17997 x_2^2 + 0,05697 x_3^2 + 0,03 x_4^2 + 2,5924 x_1 - 62,9952 x_2 - 19,9449 x_3 - 17,298 x_4 + 0,2644 x_1x_2 - 0,09998 x_1x_3 - 0,09998 x_1x_4 + 0,0044 x_2x_3 + 0,002 x_2x_4 - 0,00446 x_3x_4. \quad (4)$$

Перевірка відтворення експерименту була здійснена з використанням критерію Кохрена, а ступінь значення коефіцієнтів, отриманий за критерієм Стюдента на основі паралельних дослідів, визначає значення всіх коефіцієнтів рівняння. Водночас гіпотеза про адекватність математичної моделі (4) за критерієм Фішера не заперечується, якщо рівень значення становить 5 %.

Отримуємо графічні залежності впливу факторів, що варіюються, на питому ефективну витрату стисненого повітря (рис. 1).

Таблиця 1 – Розширена матриця плану та результатів 18 дослідів

Серія випробувань	Фактори				Витрата повітря $G_{\text{рік}}$ кг/(кВт·год)		
	$\varphi_{\text{нвп}}$	$\varphi_{\text{квп}}$	$\varphi_{\text{нвіп}}$	$\varphi_{\text{квіп}}$	Повторні випробування		Середнє значення
	X_1	X_2	X_3	X_4	1	2	$G_{\text{ср}}$
1	0	0	0	0	41,09	41,46	41,83
2	-1	-1	-1	-1	98,3	99,01	99,72
3	-1	+1	+1	+1	58,58	58,63	58,68
4	+1	-1	+1	+1	57,87	57,32	56,77
5	+1	+1	-1	+1	122,53	121,86	121,19
6	+1	+1	+1	-1	142,58	142,37	142,16
7	0	+1	-1	-1	72,76	71,88	71
8	0	-1	+1	-1	83,33	82,85	82,37
9	0	-1	-1	+1	64,59	63,3	62,01
10	+1	0	-1	-1	120,54	120,5	120,46
11	-1	0	+1	-1	72,43	71,11	69,79
12	-1	0	-1	+1	50,85	51,08	51,31
13	+1	-1	0	-1	101,98	101,85	101,72
14	-1	+1	0	-1	40,68	41,48	42,28
15	-1	-1	0	+1	104,16	103,99	103,82
16	+1	-1	-1	0	95,6	94,77	93,94
17	-1	+1	-1	0	34,36	33,92	33,48
18	-1	-1	+1	0	117,11	116,46	115,81

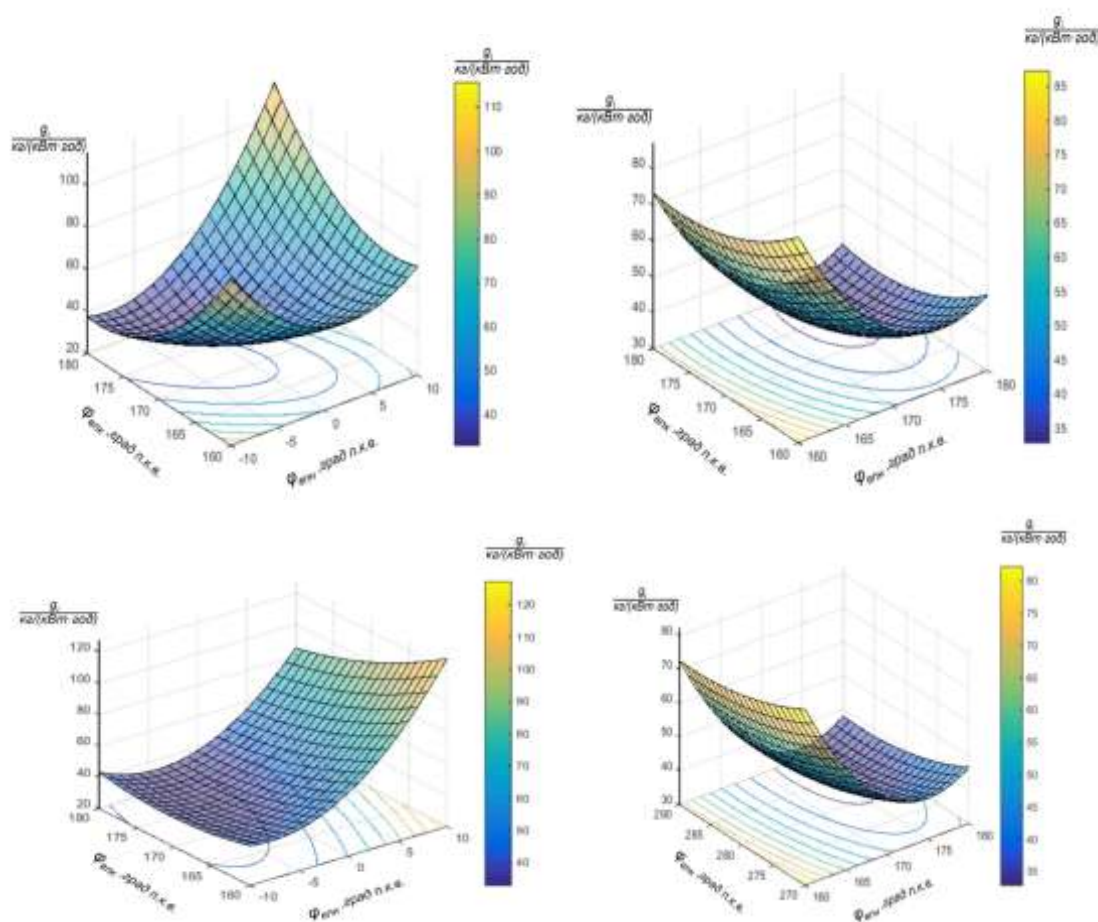


Рис. 1. Графічні залежності від впливу факторів (кутів відкриття-закриття клапанів) на питому індикаторну витрату стисненого повітря в ПД

На рис. 1 наведена характеристика ПД питомої індикаторної витрати повітря як функція кутів відкриття-закриття впускного та випускного клапанів.

Висновки

У роботі досягнуто мети, тобто проведено повний факторний експеримент (ПФЕ). На основі аналізу літератури з урахуванням варійованих факторів вирішено завдання – здійснено вибір плану проведення експерименту.

Побудовано графічні залежності впливу факторів (кутів відкриття-закриття впускних клапанів на питому ефективну витрату стисненого повітря в ПД та визначено їх вплив на індикаторну витрату повітря.

Згідно з вищезазначеними залежностями, питома ефективна витрата стисненого повітря g_i зростає зі збільшенням закриття впускного клапана (X_2) та закриття випускного клапана (X_4). Збільшення або зменшення кутів відкриття впускного (X_1) та випускного (X_3) клапанів, закриття випускного клапана також призводить до збільшення питомої ефективної витрати стисненого повітря в ПД.

Здійснено багатофакторну оптимізацію роботи ПД $D / S = 9,2/9,2$. Під час аналізу розрахунків отримано такі оптимальні параметри: $\varepsilon_0 = 0,4$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_3 = 0,75$, $p_{en} = 0,7$ та $n = \text{хв}^{-1}$. У цьому випадку $N_i = 2,23$ кВт та $g_i = 32,90$ кг/год.

Таким чином, для зниження питомої витрати стисненого повітря в ПД загалом можна розробити заходи конструктивного типу, спрямовані на модернізацію системи повітропостачання через застосування електрогідравлічного привода клапанів.

Література

1. Potentials of Hybridized Commercial Vehicles. Christian Beidl, Magnus Schmitt, Matthias Kluin, Bernd Lenzen. MTZ. 2011. № 6. P. 432–437.
2. High performance pneumatic hybrid engine with cost-effective valvetrain. Michael Butikofer. MTZ. 2011. № 2. P. 54–58.
3. Technical hybridization concept for downsizing and supercharging gasoline engines / L. Guzzella та ін. MTZ. 2010. № 71. P. 38–44.
4. Butikofer M. High performance pneumatic hybrid engine with cost-effective valvetrain. MTZ. 2011. № 72. P. 54–58.
5. Study of a single-valve reprocrating expander / X. Zang X та ін. 2016. 89. 400–413.

6. Huang CY, Hu CK, Yu CK. Experimental investigation on the performance of compressed air driven piston engine. *Energies* 2013. 6. 1731–1745.
7. Influence intake pressure на ходу висхідного екрану expander working with compressed air / W. He та ін. *Appl Therm Eng.* 2013. 51. 662–669.
8. Box G., Behnken D. New three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*. 1960. Vol. 2. P. 455–475.
9. Plackett and JP Burman «The Design of Optimum Multifactorial Experiments». *Biometrika*. 1946. 33(4). P. 305–325. doi: 10.1093/ biomet /33.4.305
10. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080994178/design-of-experiments-for-engineers-and-scientists>
11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922006596>
12. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/afc8badd-daae-4a27-9a4e-ba114fe4e5ad/content>
13. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/243062>

References

1. Potentials of Hybridized Commercial Vehicles. Christian Beidl, Magnus Schmitt, Matthias Kluin, Bernd Lenzen. MTZ. 2011. № 6. P. 432–437.
2. High performance pneumatic hybrid engine with cost-effective valvetrain. Michael Butikofer. MTZ. 2011. № 2. P. 54–58.
3. Guzzella, L., Onder, C, Donitz, C., Voser, C., Vasile, I. (2010). Technical hybridization concept for downsizing and supercharging gasoline engines. MTZ. № 71. P. 38–44.
4. Butikofer, M. (2011). High performance pneumatic hybrid engine with cost-effective valvetrain. MTZ №72. P. 54–58.
5. Zang, X, Xu, Y, Xu, J, et al. (2016). Study of a single-valve reprocrating expander. *J Energ Inst.* 89. 400–413.
6. Huang, CY, Hu, CK та Yu, CK. (2013). Experimental investigation on the performance of compressed air driven piston engine. *Energies*. 6. 1731–1745.
7. He, W., Wu, Y., Peng, Y., et al. (2013). Influence intake pressure на ходу висхідного екрану expander working with compressed air. *Appl Therm Eng.* 51. 662–669.
8. Box, G., Behnken, D. (1960). New three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*. Vol. 2. P. 455–475.

9. Plackett and JP Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments". *Biometrika* 33 (4). P. 305–325. 1946 doi: [10.1093/biomet/33.4.305](https://doi.org/10.1093/biomet/33.4.305)
10. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080994178/design-of-experiments-for-engineers-and-scientists>
11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922006596>
12. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/afc8badd-daee-4a27-9a4e-ba114fe4e5ad/content>
13. <http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/243062>

Філатова Ганна Євгенівна¹, д.т.н., проф., проф. кафедри комп'ютерної інженерії та програмування filatova@khpi.edu.ua, тел. +38(098)778-14-45, ORCID: 0000-0003-1982-2322,

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»), вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна,

Нікітченко Ігор Миколайович², к.т.н., доц. кафедри двигунів внутрішнього згоряння, dvs@khadi.kharkov.ua, тел. +38(099)311-61-10, ORCID: 0000-0002-9481-4296.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

Тесленко Едуард Вікторович², асистент кафедри двигунів внутрішнього згоряння dvs@khadi.kharkov.ua, тел. +38 (067) 853-83-85, ORCID: 0000-0001-8833-1733,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

Стрілець Максим Васильович², аспірант кафедри двигунів внутрішнього згоряння, 0669233845m@gmail.com, тел. +38 (066) 923-38-45, ORCID: 0009-0004-1041-6285

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

Савич Дмитро Васильович², аспірант кафедри двигунів внутрішнього згоряння Savenok.dima@gmail.com, тел. +38 (066) 786-30-09, ORCID: 0009-0002-7548-4831,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Application of methods of experiment planning theory for assessing the economy of a pneumo-engine

Abstract. Problem. In the article, using computer modeling in the MATLAB environment, a full factorial experiment was conducted to optimize the working process of a pneumatic engine, during which the influence of independent parameters (valve opening-closing angles) on its specific indicator air flow rate was evaluated. As a result of the experiment, the second-order regression equation was obtained and the most significant factors and their mutual combinations affecting the response parameter were determined. **Goal.** Conduct a full factorial experiment (FFE). **Task:** based on the analysis of the literature, taking into account various factors, select the plan for conducting the experiment. To construct graphical dependences of the influence of factors (angles of opening and closing of intake valves on the specific effective flow rate of compressed air in the pneumatic engine and to determine their influence on the indicator air flow rate. **Methodology.** The central composite rotatable plan of a different order proposed by Box and Behnken was used in the work. Previously, in order to reduce the number of experiments, the Plackett and Burman method was used to filter out insignificant factors. The factors varied on three levels. The subject of the study is the relationship between the specific indicator flow of compressed air and the opening-closing angles of the pneumatic engine valves. **Results.** It can be seen from the above relationships that the specific effective flow rate of compressed air g_i increases with an increase in the closing of the intake valve (X2) and an increase in the closing of the exhaust valve (X4). Increasing or decreasing the opening angles of the intake (X1) and exhaust (X3) valves and the closing of the exhaust valve also leads to an increase in the specific effective flow rate of compressed air in the pneumatic engine. A multifactorial optimization of the operation of the pneumatic engine $D/S = 9.2/9.2$ was carried out. As a result of the analysis of the calculations, kW and kg/h were obtained. **Originality.** The proposed method of determining the extremum of the specific indicator flow rate of compressed air. This is achieved by conducting an extreme experiment to construct a multifactor response function followed by solving the unconditional optimization problem using the simplex method. **Practical value.** The dependence of

the minimum specific indicator flow rate of compressed air on the angle of valve opening and closing is selected as parameters for assessing the technical level of pneumatic engine.

Key words: factorial experiment, pneumatic engine, regression equation, intake and exhaust valves.

Filatova Ganna Evhenivna¹, D.Sc., Prof., Department of Computer Engineering and Programming, e-mail: filatova@khpi.edu.ua, tel. +38(098)778-14-45, ORCID: 0000-0003-1982-2322.

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (NTU "KhPI"). 2, Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine,

Nikitchenko Ihor Mykolajovych², Ph.D., Assoc. Prof., Department of Internal Combustion Engines, dvs@khadi.kharkov.ua, tel. +38(099)311-61-10, ORCID: 0000-0002-9481-4296.

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine,

Teslenko Eduard Viktoroviya², Assistant, Department of Internal Combustion Engines, Kharkiv National Automobile and Highway University dvs@khadi.kharkov.ua, tel. +38 (067) 853-83-85, ORCID: 0000-0001-8833-1733.

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine,

Maksym Vasilyovych Strilets², post-graduate student, Department of Internal Combustion Engines, 0669233845m@gmail.com, tel. +38 (066) 923-38-45, ORCID: 0009-0004-1041-6285

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Savich Dmytro Vasyliovych², post-graduate student, Department of Internal Combustion Engines, Savenok.dima@gmail.com, tel. +38 (066) 786-30-09, ORCID: 0009-0002-7548-4831

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
