

Д.В. Левченко, О.В. Грицюк, А.П. Кузьменко

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ НАСТУПНОГО КРОКУ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ У ДОСЛІДЖЕННІ ДВЗ

Показана роль області математичного планування експерименту, а також переваги застосування регресійних моделей у вигляді степеневих поліномів при проведенні регульовальних робіт та доводці існуючих конструкцій ДВЗ. Надамо сучасні орієнтири в сфері планування експерименту при дослідженні процесів в ДВЗ, спираючись на прогресивні ідеї області математичного планування експерименту та технічні можливості збору, обробки і представлення результатів експерименту. Показані вимоги щодо розвитку напрямку експериментального дослідження і потреби в багатофакторному аналізі процесів, що являються комплексними показниками якості систем. На прикладі підготовки експерименту дослідження пускових якостей дизеля серії ДА10 показана нагальна потреба організації шестифакторного експерименту. Визначені етапи планування дослідного експерименту та показане місце математичного планування експерименту в процесі підготовки дослідження процесів в ДВЗ. Обґрунтовані недоліки традиційних методів математичного планування експерименту та запропоновані способи їх усунення. Показані потреби в подальших пошукових роботах з питань постановки багатофакторних експериментів та підвищення точності аналітичного опису та експериментального виміру досліджуваного параметру. В роботі представляється програмний апарат *Approximation LSM* власної розробки, що виконує ряд вимог, які були висунуті до традиційного методу обробки результатів експериментальних досліджень. Згідно розглянутих можливих рішень задач, поставлених до математичного планування експерименту, визначені напрямки, що потребують подальшого аналізу для створення нових методик складання «розріджених» та несиметричних планів експерименту із кількістю факторів не менше шести, визначення критеріїв оцінки повноти і ваги факторів в плані для «розріджених» та несиметричних планів. Окрім того, запропоновані методики проведення пошукових експериментів з оптимізації визначного параметру із використанням уточнюючих планів експерименту та методики оцінки коефіцієнтів моделі поліноміальної регресії для можливості зменшення кількості членів поліному.

Ключові слова: планування експерименту; рівняння регресії; пуск дизеля; багатофакторний експеримент.

Вступ

У вітчизняному двигунобудуванні для проведення пошукових експериментальних досліджень широко розповсюджено використання методів математичного планування експерименту. Необхідність застосування саме емпіричних методів пов'язано із неспинним процесом вдосконалення конструкції систем та оптимізації роботи вже створеного двигуна на етапі доводочних робіт. Такий напрям несе власно практичні цілі щодо досягнення гарантованого результату в максимально стиснені терміни і з можливістю попередньої оцінки витрат на виконання дослідження.

Наразі поставлена задача поліпшення експлуатаційних якостей автомобільного дизеля серії ДА10 шляхом реалізації раціонального алгоритму управління системами пуску та холостого ходу. В роботі [1] відзначено важливість оцінки параметрів високообертового багатоцільового двигуна в широкому спектрі режимів роботи, починаючи з перехідних режимів при пускових частотах обертання колінчастого вала.

Оцінку пускових якостей можна вести за рядом параметрів, що характеризують швидкість і якість виходу двигуна на самопідтримуючий режим. Для проведення оптимізації процесу пуску необхідна розробка гнучкої та комплексної математичної моделі із врахуванням багатьох факторів впливу на досліджуваний процес.

Засоби математичного планування експерименту (МПЕ) є найбільш придатними для оцінки комплексних технічних показників систем і побудови поліномів регресії. В ході аналізу впливу змінних параметрів на пускові якості дизеля було вирішено сформулювати задачу пошуку емпіричної залежності шести лінійно незалежних факторів на оціночний параметр якості пуску.

Огляд тематичних досліджень

Необхідність перегляду традиційного для харківської школи дизелебудування методу математичного планування експерименту [2], що дає можливість оцінки залежності цільової функції оптимізації від визначених факторів впливу, з'явилася водночас із проблемою неможливості на практиці організувати відповідний заданому ортогональному плану експеримент [3]. Це дало поштовх для перегляду методичних можливостей обробки експериментальних даних.

Більшість експериментальних задач, що ставилися перед дослідниками і конструкторами, в процесі створення і вдосконалення дизелів серії ДА10, прототипом яких є високообертовий дизель 4ДТНА1 розробки ДП «ХКБД», зводилися до оптимізації функції, що залежить від двох або трьох факторів. В статті [4] описано використання МПЕ у випадку експериментальних досліджень пускових якостей дизеля 2ДТАВ, що визначають залежність

поточної частоти обертання колінчастого вала від трьох незалежних між собою параметрів.

Відома робота [5], в якій приведені математичні моделі у вигляді рівнянь регресії із п'ятьма врахованими змінними факторами. Такий підхід є потужним і перспективним апаратом в питаннях оптимізації, проте методи отримання багатофакторних рівнянь регресії із кількістю змінних більше трьох залишаються не висвітленими та малопоширеними через складність проведення експериментальних робіт.

При виникненні проблеми забезпечення сучасних пускових якостей автомобільного дизеля серії ДА10 було розглянуто ряд робіт, наприклад, [6-10], що дають широке уявлення про пускові характеристики дизелів та оцінку основних показників впливу, що використовуються в більшості конструкцій дизелів таких як: потужність електростартерного приводу, температура підігріву повітря в камері згорання, ступінь стиснення, кут випередження впорскування палива тощо.

Мета і задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка та обґрунтування нових вимог до методу математичного планування експерименту при його використанні для вирішення технічних питань вдосконалення конструкції ДВЗ.

Визначення технічної задачі пошуку

Виходячи з поставленої задачі поліпшення пускових якостей дизеля серії ДА10 необхідно визначитися із функцією відгуку, за якою власне буде проводитись оптимізація. До параметрів, що можуть якісно характеризувати пуск дизеля можна віднести запропоновану в [4] частоту обертання колінчастого вала (КВ) на 7 секунд після подачі напруги на обмотку електростартера. Цей параметр добре відтворює процес прискорення і вихід двигуна на самостійний режим холостого ходу, проте не дає якісної оцінки організації умов пуску. Іншим параметром для оцінки швидкості пуску ДВЗ є момент досягнення межі 75 % спалахів за 2 оберти КВ [7]. Останній параметр являється більш інформативним, особливо при можливості оцінки якості організації паливо-повітряної суміші по формі індикаторних діаграм, проте значно складніший в реєстрації. Фіксація моменту пуску є важливою задачею, бо за його досягненням можна визначити перехід двигуна на режим холостого ходу, до якого вже пред'являються інші вимоги і організуються інші алгоритми управління.

При підготовці до запланованого дослідження (найбільш впливових на швидкість і якість пуску параметрів) було визначено шість окремих лінійно незалежних факторів: частота прокручування КВ

стартером (n , хв^{-1}), циклова подача палива ($Q_{\text{ц}}$, $\text{мм}^3/\text{цикл}$), температура свічок розжарювання ($t_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$), час прогріву повітря камери згорання свічкою розжарювання перед пуском ($\tau_{\text{ср}}$, с), кут випередження впорскування палива ($\Theta_{\text{ввп}}$, град п.к.в.), момент опору двигуна ($M_{\text{оп}}$, Н·м).

Одним із невід'ємних процесів підготовки експерименту є формування і аналіз меж зміни кожного з управляючих факторів, що часто вимагає постановки передуючого експерименту. Так певні параметри можуть бути фіксовані не прямим методом, а через інші, однозначно залежні.

Для оцінки факторів в умовах пуску двигуна доводиться користуватись допоміжними параметрами, які мають однозначну залежність від фактору і можуть бути встановлені за допомогою регульованих налаштувань чи визначені поширеними засобами реєстрації. Для калібрування допоміжних параметрів планується проведення ряду експериментів. Так, наприклад, визначається залежність циклової подачі від кута повороту регульовального гвинта збагачення, чи сталої температури свічок розжарювання від напруги живлення. Для встановлення кута випередження впорскування палива планується використати спеціальний механізм, що може змінювати кут випередження в межах $-12\dots+12$ град п.к.в.

Для отримання достовірної математичної моделі вигляду $\tau_{75\%} = f(n, Q_{\text{ц}}, t_{\text{ср}}, \tau_{\text{ср}}, \Theta_{\text{ввп}}, M_{\text{оп}})$ на базі проведеного ряду експериментальних досліджень і подальшої перевірки її відтворюваності та адекватності необхідно мати впевненість у достовірності встановлення та виміру вхідних факторів. Результати випробувань, в першу чергу, залежать від обраного підходу і технічної організації. Методи оцінки достовірності отриманих експериментальних даних згідно теорії математичної статистики базуються на визначенні чисельних показників розподілу випадкових величин, а саме математичного очікування вимірюваного параметру і дисперсії відтворюваності експерименту [11].

Етап планування експерименту являється найбільш відповідальним і важливим, починаючи від визначення мети дослідження і закінчуючи вибором зовнішніх умов, засобів реєстрації, апаратної підтримки і прагнення до звільнення вимірюваних параметрів від впливу множини неконтрольованих факторів.

Аналіз існуючого апарату МПЕ

Досягаючи при вдосконаленні системи певної межі, перетинання якої за рахунок основних відомих шляхів неможливо, виникають потреби пошуку взаємозв'язків між критеріями, які мають більш слабкий та складний вплив на цільовий параметр.

Пошук та обґрунтування теоретичних моделей стає надто складною та індивідуальною задачею, яка не виправдовує витрати часу на її розробку та доведення адекватності. Таким чином, побудова емпіричних регресивних моделей, підкріплених достовірними експериментальними даними, є найбільш перспективним напрямом пошукових робіт оптимізації вже існуючих систем, а його розвиток і прискорення до все більшого і складнішого кола практичних задач дозволяють знизити витрати на дослідні роботи.

Зменшення ціни експериментальних досліджень завжди являється поточною задачею, що формулює підхід і методи організації планування експерименту. Досі складною, проте важливою задачею МПЕ при багатофакторному аналізі являється зменшення кількості експериментів з мінімальними втратами інформації і достатньою для поточної задачі точністю оцінки впливу на функцію відгуку кожного фактору окремо та їх поєднань.

Так, наприклад, повний факторний експеримент для шести змінних із варіюванням кожного фактору на двох рівнях вимагає кількість необхідних дослідів: $2^6 = 64$.

Така кількість експериментів є уявною і може бути реалізована за певний проміжок часу, проте, для пошуку достовірної математичної моделі досліджуваної залежності часто буває недостатньо варіювання параметрів впливу на двох рівнях через неможливість оцінки характеру такої залежності, а лише можливості оцінки тенденції її впливу. Для наочності розберемо результати експериментів, що наведені в [4].

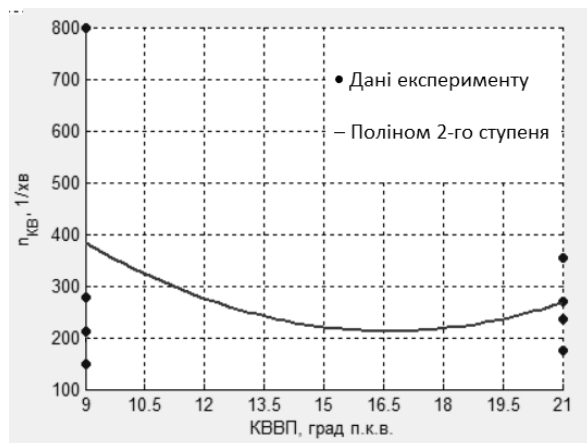


Рис. 1. Залежність частоти обертання КВ на 7-й секунді пуску від кута випередження впорскування палива (варіювання факторів на 2-х рівнях)

На рис. 1 представлені результати розрахунку експерименту згідно плану повного факторного експерименту із варіюванням факторів на двох рів-

нях, що був отриманий шляхом відкидання з наведених в [4] результатів експерименту зв'язків середніх значень факторів. В порівнянні з наведеним на рис. 1 виглядом поліному 2-го ступеня, що описує функцію відгуку, приведемо аналогічну залежність при використанні ортогонального плану експерименту із варіюванням факторів на трьох рівнях.

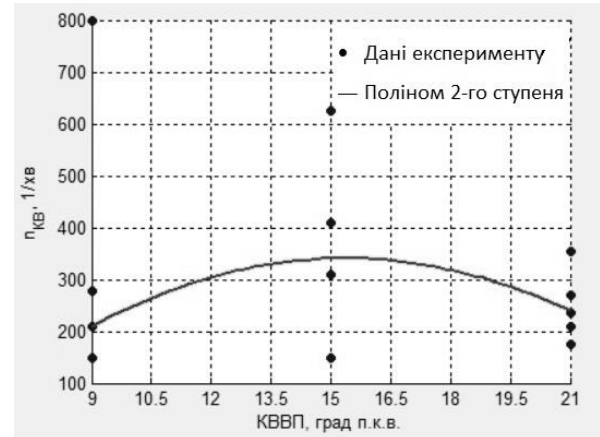


Рис. 2. Залежність частоти обертання КВ на 7-й секунді пуску від кута випередження впорскування палива (варіювання факторів на 3-х рівнях)

Зауважимо, що не дивлячись на абсолютну відмінність математичних моделей описання залежності частоти обертання КВ від кута випередження впорскування палива, статистична оцінка середньоквадратичного відхилення (СКВ) дорівнює $\sigma = 50,65 \text{ хв}^{-1}$ для першого випадку і $\sigma = 49,07 \text{ хв}^{-1}$ для другого. Що свідчить про неможливість оцінки недоліків планування експерименту за результатами цього ж експерименту.

Для оцінки характеру функції відгуку, а не тенденції впливу для кожного окремого фактору, необхідно використання ступеня варіювання фактору $k \geq 3$. За таких умов кількість експериментів різко зростає ($3^6 = 729$), що не представляється можливим для практичної реалізації. Існуючий на даний момент апарат націлений на зниження кількості необхідних експериментів, наприклад, дрібний факторний план, дає $3^{6-1} = 243$ дослідів, що значно краще, проте, все одно залишається завеликим для формування плану експерименту.

Заради справедливості варто визнати, що далеко не завжди різниця між функціями, отриманими при варіюванні факторів на двох і на трьох рівнях, мають такі невідповідності. Якщо досліджуваний фактор має лінійний характер залежності і значний рівень впливу на функцію відгуку, то не має сенсу розглядати центральне значення фактору, і можна обійтись лише крайніми його значеннями.

Такі роздуми приводять до міркувань, що не обов'язково створювати симетричний план випробувань відносно кожного з факторів при умові попередньо відомої сили і характеру впливу окремого фактору на функцію відгуку. Для пошуку впливу окремих факторів можна запропонувати проведення невеликої кількості простіших випробувань при наявності лише одного фактору, що дадуть необхідну інформацію про рівень варіювання досліджуваного фактору в багатфакторному аналізі.

В якості критерія оцінки можливо застосовувати кореляційний момент (1), що дає змогу оцінити ступінь лінійної залежності між випадковими величинами.

Формула кореляційного моменту в загальному вигляді:

$$\mu_{xy} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - M(X))(y_j - M(Y)) \cdot p_{ij}, \quad (1)$$

де x, y – відповідно випадкові результати вимірювання факторів та функції відгуку; n – кількість дослідів; $M(X)$ та $M(Y)$ – математичні очікування величин фактору та функції відгуку; $p_{ij} = p_{x_i} \cdot p_{y_j}$ – ймовірність отримання даного результату вимірювання.

Для опису фізичного процесу у вигляді регресійної моделі широко розповсюджені поліноми n -го ступеня [2,11,12], що дають можливість оцінки параметру, функціональні зв'язки із факторами якої заздалегідь невідомі. Від вибору ступеня поліному залежить точність описання реального процесу, показником якої являється зменшення середньоквадратичного відхилення експериментальних результатів від кривої регресії. В [2] зазначено, що в більшості випадків залежність описується поліномом другого ступеня ($n = 2$).

При виборі ступеня поліному слід враховувати об'єм даних, що підлягає обробці. Так для коректного описання процесу поліномом першого ступеня достатньо двох достовірних результатів експерименту. Для багатфакторного аналізу це означає варіювання факторів на двох рівнях мінімального і максимального значення. Відповідно, для описання квадратичного поліному необхідно три рівня варіювання, а кубічного – чотири.

Варто розуміти, що при використанні моделей вищих порядків за умови браку інформації, ми втрачаємо ефект осереднення експериментальних даних і отримуємо регресійні моделі, що значним чином викривляють реальний процес при кращих показниках точності моделі. Прикладом може послужити та сама залежність (рис. 2) при описанні її кубічним поліномом (рис. 3). При цьому середньоквадратичне відхилення склало всього $3,7 \text{ хв}^{-1}$, про-

те з графіку (рис. 3) видно, що знайдена залежність не відповідає дійсному і не може вважатися адекватною для проведення оптимізації.

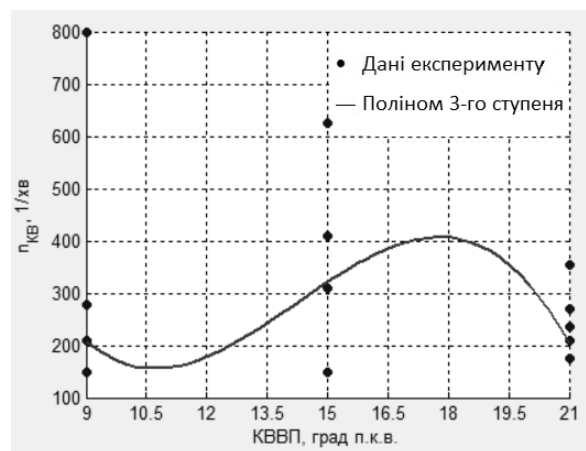


Рис. 3. Залежність частоти обертання КВ на 7-й секунді пуску від кута випередження впорскування палива (варіювання факторів на 3-х рівнях)

В класичній методиці обробки експериментальних даних методом найменших квадратів, що має мету уніфікації методу, розрахунок значень коефіцієнтів поліному проводиться в нормованих факторах, що варіюються в межах від -1 до 1.

При пошукових випробуваннях за межами вже вивчених окремих факторів на практиці доводиться зіштовхуватись із проблемами відхилень фактичних вимірюваних фізичних величин від попередньо заданих на етапі планування експерименту. Це відбувається через велику інерційність певних процесів, гістерезису, впливу додаткових неврахованих факторів, що обмежують діапазон зміни контрольованого параметру. Таким чином, для підвищення точності описання реального процесу необхідно проводити розрахунок коефіцієнтів поліному регресії для факторів із реальними зафіксованими при випробуванні значеннями.

Накоплений безпосередньо авторами цієї статті та фахівцями ХНАДУ [3-5] досвід постановки та здійснення багатфакторних досліджень привів до розроблення на кафедрі ДВЗ ХНАДУ спеціалізованого програмного комплексу Approximation_LSM, який дозволяє гнучкіше обробляти дані експериментів. При застосуванні цього комплексу для проведення пошуку аналітичної функції у вигляді поліному регресії за наявними даними експерименту представляються фактичні вхідні дані в зручних для користувача одиницях вимірювання і обирається ступінь поліному ($n = 1 \dots 4$), яким планується описання залежності.

До переваг нового розрахункового апарату належить: по-перше, повна автоматизація процесу

розрахунку регресійної моделі, можливість обробки неповних планів при наявності певного зниження точності моделі, врахування зафіксованих фактичних значень факторів, замість відтворюваних згідно плану експерименту, а по-друге, можливість миттєвої оцінки адекватності моделі у вигляді значень абсолютної максимальної похибки, середньоквадратичного відхилення та можливості візуалізації отриманої залежності у вигляді графіку функції.

Аproximation_LSM також оснащений алгоритмом пошуку екстремуму по отриманій в результаті розрахунку функції регресії на проміжку обмеженому заданими діапазонами факторів. Реалізуючи алгоритм лінійного програмування, програма підбирає комбінацію значень вхідних факторів, що відповідають максимуму чи мінімуму функції на вибір користувача. В подальших візуалізаціях за необхідності ці значення будуть прийматись за константи для факторів, що не входять до відтвореного графіку залежності.

Першу апробацію переваг Аproximation_LSM авторами описано в [3], де успішно було вирішено проблему пошуку функції її відгуку в умовах неможливості практичної організації повного факторного плану експерименту. Орієнтуючись на наявні можливості обробки експериментальних даних, можна значним чином коригувати процес підготовки плану експерименту, добиваючись найбільш раціональних показників об'єму дослідження до повноти отриманої інформації.

Постановка вимог до методу МПЕ

Виходячи з наведеного щодо поставлених задач, варто сформулювати вимоги до нового методичного забезпечення використання математичного планування експерименту, що буде відповідати сучасним потребам науково-дослідницьких робіт в сфері двигунобудування. Для цього сформулюємо етапи, що включають планування дослідного експерименту:

- 1) визначення задачі, що має бути вирішена;
- 2) визначення параметрів відгуку, по яких проводиться оцінка результату;
- 3) визначення змінних контрольованих параметрів, що формують параметри відгуку;
- 4) розробка плану 6-ти факторного експерименту;
- 5) визначення форми і вигляду очікуваних результатів випробувань;
- 6) розробка методики обробки результатів випробувань;
- 7) розробка методики оцінювання достовірності результатів;
- 8) організація технічного забезпечення;

- 9) організація необхідних зовнішніх умов для проведення експерименту.

Теорія математичного планування експерименту націлена покрити чотири з наведених етапів, що являються універсальними методами і можуть застосовуватися для більшості типових задач пошуку взаємозв'язків чи оптимізації функції за параметрами.

Проводячи роботу по підготовці експерименту дослідження багатофакторної оптимізації пускових якостей дизеля серії ДА10 рішення щодо оптимального плану шестифакторного експерименту є основною метою пошуків і вимагає розробки гнучкої методики прийняття обґрунтованих рішень.

З метою зменшення об'єму експериментальних точок, задаючись умовою достовірності отриманих експериментальних даних, необхідно сформулювати раціональний план випробувань. Виходячи із поставленої задачі оптимізації і неможливості організації повного і дробного факторного експерименту, доцільним являється використання методів уточнюючих планів, наприклад, згідно симплексного методу або методу еволюційного планування, що являється більш складним в організації і потребує постійної взаємодії процесу планування і отримання результатів відгуку на запит дослідника.

Початковий план експерименту доцільно мінімізувати за рахунок асиметрії відносно рівнів варіювання факторів та розробки альтернативних до ортогональних планів. Наприклад, в поширеній методиці з оптимізації вибору факторного простору [13], автори доводять нераціональність використання ортогонального плану для планування експерименту через його низький рівень оцінки характеру взаємозв'язків факторів.

Таким чином, необхідними вимогами до апарату МПЕ при вирішенні задач дослідження із вдосконалення конструкцій систем ДВЗ є:

- розробка таблиць багатофакторних “розріджених” планів експерименту для кількості факторів ≤ 6 , виконуючи умову мінімізації об'єму випробувань;
- розробити методики для формування альтернативних ортогональним несиметричних планів експерименту із можливістю використання різної кількості рівнів варіювання окремих факторів;
- визначити критерії оцінки повноти і ваги факторів в плані для “розріджених” та несиметричних планів експерименту;
- сформулювати методики пошукових експериментів з оптимізації визначеного параметру із використанням уточнюючих планів експерименту;

- сформулювати методики оцінки коефіцієнтів моделі поліноміальної регресії для можливості зменшення кількості членів поліному.

Висновки

1. Визначені нові вимоги до методу математичного планування експерименту при його використанні для вирішення технічних питань вдосконалення конструкції ДВЗ.

2. Сформульовані етапи планування експерименту на прикладі підготування шестифакторного експерименту дослідження пускових якостей дизеля серії ДА10.

Список літератури:

1. Грицюк Александр Васильевич. Теоретические основы и практические методы создания высокооборотного малолитражного дизеля многоцелевого назначения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Грицюк Александр Васильевич. – Харьков, 2010. – 430 с. – Библиогр. : с. 407-430. 2. Методические указания по применению методов математического планирования эксперимента в НИР студентов, в курсовом и дипломном проектировании ; под ред. : А.Э. Симсона. – Харьков : Харьковский институт инженеров жел.-дор. Транспорта им. С.М. Кирова, 1982. – 34 с. 3. Грицюк А.В. Метод экспериментально-расчетного определения жесткости кривошипа коленчатого вала / А.В. Грицюк, И.С. Ревелюк, Д.В. Левченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2017. – № 1. – С. 21-27. 4. Грицюк А. В. Опыт применения метода планируемого эксперимента в исследованиях переходных процессов пуска дизельного двигателя / А.В. Грицюк // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012. – № 2. – С. 53-59. 5. Воронков О.И. Методология организации рабочего процесса пневмодвигуна комбинованой энергетичной установки миського автомобіля : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.05.03 "Двигуни та енергетичні установки" / Воронков Александр Иванович ; Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – Харків, 2017. – 42 с. 6. Микулин Ю.В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре / Ю.В. Микулин, В.В. Карницкий, Б.А. Энглин. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с. 7. Назаров В.А., Пусковые процессы семейства перспективных дизелей / В.А. Назаров, Н.Н. Сметнев ; под ред. : В.И. Шаховцева. – М. : НИИНавтопром, 1967. – 104 с. 8. Казаков Александр Владимирович. Методика оценки эффективности устройств облегчения пуска холодного двигателя автомобиля / дис. ... канд. техн. наук. – Оренбург, 2018. – 137 с. – Библиогр. : с. 111 - 126. 9. Манзин М.Ю. К вопросу обеспечения надежного пуска дизельных двигателей в условиях низких температур / М.Ю. Манзин, А.А. Заикин, С.В. Рослов, В.В. Иванов // Вестник Сибирской государственной автомобильной академии. – 2017. – № 3(55). – С. 88-94. 10. Анацкий О.О. Анализ факторов влияющих на пусковые характеристики дизельных двигателей тепловозов та допоміжних пристроїв для полегшення пуску / О.О. Анацкий, С.В. Бобрицкий // Вісник східноукраїнського

національного університету ім. В. Даля. – 2015. – № 1(218). – С. 272-276. 11. Адлер Ю.П., Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с. 12. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента / В.З. Бродский. – М.: Наука, 1974. – 223 с. 13. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями : учебн. пособие для вузов / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.

Bibliography (transliterated):

1. Grytsyuk, A.V. (2010), *Theoretical foundations and practical methods of creating a high-speed small-capacity diesel engine of multi-purpose: dissertation [Teoreticheskie osnovy i prakticheskie metody sozda-niya vysokooborotnogo malolitrazhnogo dizelya mnogocелеvogo naznacheniya: dis. ... d-ra tehn. nauk]*, Kharkiv, 430 p. 2. (1982), *Guidelines for the application of methods of mathematical experimental design in students research, in course and diploma design [Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu metodov matematicheskogo planirovaniya eksperimenta v NIR studentov, v kursovom i diplomnom proektirovani]*, Harkovskij institut inzhenerov zhel.-dor. Transporta im. S.M. Kirova, Kharkiv, 34 p. 3. Grytsyuk, A.V., Revelyuk, I.S., Levchenko, D.V. (2017), "Method of experimental and calculated determination of throw stiffness of crankshaft" ["Metod eksperimentalno-raschetnogo opredeleniya zhestkosti krivoshipa kolenchatogo vala"], *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, №1, p.p. 21-27. doi: 10.02998/0419-8719.2017.1.05. 4. Grytsyuk, A.V. (2012), "Experience of applying the method of the planned experiment in studies of transient processes of starting a diesel engine" ["Opyt primeneniya metoda planiruемого e`ksperimenta v issledovaniyakh perekhodny`kh processov puska dizel'nogo dvigatelya"], *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, №2, p.p. 53-59. 5. Voronkov O.I. (2017), *Methodology for organizing the workflow of a pneumatic engine combined power plant of a city car: Author's abstract, [Metodologiya orhanizatsii robochoho protsesu pnevmodyhuna kombinovanoi enerhetychnoi ustanovky miskoho avtomobilya: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk]*, Kharkiv, 42 c. 6. Mikulin, Yu.V., Karniczkiy, V.V., E`nglin, B.A., (1971), *Starting of cold engines at low temperature [Pusk kholodny`kh dvigatelej pri nizkoj temperature]*, *Mashinostroenie*, Moscow, 216 p. 7. Nazarov, V.A., Smetnev, N.N. (1967), *Starting processes of the family of prospective diesel engines [Puskovy`e processy` semejstva perspektivny`kh dizelej]*, *NIINavtoprom*, Moscow, 104 p. 8. Kazakov A.V. (2018), *Methods for assessing the effectiveness of devices to facilitate the start of a cold car engine: dissertation [Metodika ocenki e`ffektivnosti ustrojstv oblegcheniya puska kholodnogo dvigatelya avtomobilya: dis. ... kand. tekhn. nauk.]*, Orenburg, 137 c. 9. Manzin, M.Yu., Zaikin, A.A., Roslov, S.V., Ivanov, V.V. (2017), "To the question of ensuring reliable launch of diesel engines in the conditions of low temperatures" ["K voprosu obespecheniya nadezhnogo puska dizel'ny`kh dvigatelej v usloviyakh nizkikh temperatur"], *Vestnik SibADI*, № 3(55), pp. 88-94. doi: 10.26518/2071-7296-2017-3(55)-88-94. 10. Anatskyi, O.O., Bobrytskyi, S.V. (2015), "Analysis of factors affecting starting characteristics and diesel engines assistive devices to facilitate pusku" ["Analiz faktoriv vplyvaiuchykh na puskovi kharakterystyky dyze-lnykh dvyhuniv teplovoziv ta dopomizhnykh prystroiv dlia polehshennia pusku"], *Visnyk SNU im. V. Dalia*, № 1(218), pp. 272-276. 11. Adler, Yu.P., Markova, E.V., Granovskij, Yu.V. (1976), *Planning an experiment when searching for optimal conditions [Planirovanie e`ksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovij]*, *Nauka*, Moscow, 280 p. 12. Brodskij. V.Z. (1974), *Introduction to factor planning of the experiment [Vvedenie v faktornoe planirovanie e`ksperimenta]*, *Nauka*, Moscow, 223 p. 13. Sobol', I.M., Statnikov, I.M. (2006), *The choice of optimal parameters in problems with many criteria [Vy`bor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami]*, *Drofa*, Moscow, 175 p.

Надійшла до редакції 01.07.2019 р.

Левченко Денис Вадимович – аспирант кафедры ДВЗ Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: denislev4enko@gmail.com.

Грицюк Олександр Васильович – доктор техн. наук, старший науковий співробітник, головний конструктор “Науково-виробничого підприємства Дизель Груп”, Харків, Україна, e-mail: dthkbd@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0002-5596-6254>.

Кузьменко Анатолій Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедри ДВЗ Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: kuzmatolja@gmail.com.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СЛЕДУЮЩЕГО ШАГА ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПЛАНИРУЕМОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ ДВС

Д.В. Левченко, А.В. Грицюк, А.П. Кузьменко

Показана роль в области математического планирования эксперимента, а также преимущества применения регрессионных моделей в виде степенных полиномов при проведении регулировочных работ и доводке существующих конструкций ДВС. Предоставлены современные ориентиры в области планирования эксперимента при исследовании процессов в ДВС, опираясь на прогрессивные идеи области математического планирования эксперимента и технические возможности сбора, обработки и представления результатов эксперимента. Показаны требования по развитию направления экспериментального исследования и потребности в многофакторном анализе процессов, которые являются комплексными показателями качества систем. На примере подготовки эксперимента исследования пусковых качеств дизеля серии DA10 показана насущная необходимость организации шестифакторного эксперимента. Определены этапы планирования исследовательского эксперимента и показано место математического планирования эксперимента в процессе подготовки исследования процессов в ДВС. Обоснованы недостатки традиционных методов математического планирования эксперимента и предложены способы их устранения. Показаны потребности в дальнейших поисковых работах по вопросам постановки многофакторных экспериментов и повышения точности аналитического описания и экспериментального измерения исследуемого параметра. В работе представлен программный аппарат Approximation_LSM собственной разработки, который выполняет ряд требований выдвинутых к традиционному методу обработки результатов экспериментальных исследований. Согласно рассмотренным возможным решениям задач, поставленных в математическом планировании эксперимента, определены направления, требующие дальнейшего анализа для создания новых методик составления «разреженных» и несимметричных планов эксперимента с количеством факторов не меньше шести, определение критериев оценки полноты и веса факторов в плане для «разреженных» и несимметричных планов. Кроме того, предложены методики проведения поисковых экспериментов по оптимизации выдающегося параметра с использованием уточняющих планов эксперимента и методики оценки коэффициентов модели полиномиальной регрессии для возможности уменьшения количества членов полинома.

Ключевые слова: планирование эксперимента; уравнение регрессии; пуск дизеля; многофакторный эксперимент.

SUBSTANTIATION OF THE NECESSITY OF THE NEXT STEP OF THE EXPERIMENTAL DESIGN METHOD IN THE RESEARCH OF ICE

D.V. Levchenko, O.V. Grytsyuk, A.P. Kuzmenko

The role of the branch of mathematical experimental design, as well as the advantages of using regression models in the form of power-polynomials during adjustment and the upgrading of existing structures of the ICE, is shown. The modern guidelines in the branch of experimental design while studying the ICE processes are given, based on the progressive ideas of the branch of experimental design and the technical possibilities of collecting, processing and presenting the results of the experiment. The requirements for the development of the direction of experimental research and necessity of multifactorial analysis of processes that are complex indicators of the quality of systems are shown. As an example of the experimental design, the study of the starting qualities of the diesel engine series DA10 shows the urgent need for organizing an experiment with six-factors. The stages of the experimental design process are determined and the place of the mathematical experimental design is shown in the process of preparing the research of the ICE processes. The disadvantages of traditional methods of mathematical experimental design and the ways of their elimination are substantiated. The requirements of the further research in the branch of multi-factor experiments and the improvement of the accuracy of the analytical description and the experimental measurement of the investigated parameter are shown. The paper presents the Approximation_LSM software program by authors own design, which execute a number of requirements that have been advanced to the traditional method of processing the results of experimental studies. According to the considered solutions to the tasks are set for the mathematical experimental design, are determined the directions that require further analysis for the creation of new methods for the compilation of "diluted" and asymmetric plans of the experiment with a number of factors of not less than six, determination of criteria for assessing the completeness and the factors influence in terms of "diluted" and asymmetric plans. In addition, the proposed methods of conducting research experiments to optimize a significant parameter with the use of refinement of the experiment plans and the methodology for estimating the coefficients of the polynomial regression model for the possibility of reducing the number of the polynomial components.

Key words: experimental design; regression equation; diesel start-up; multifactor experiment.