УДК 532.528:621 https://doi.org/10.15407/itm2021.00.007

О. В. ПИЛИПЕНКО, С. І. ДОЛГОПОЛОВ, Н. В. ХОРЯК, О. Д. НІКОЛАЄВ

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВНУТРІШНІХ ТА ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА РОЗКИД ТЯГИ РІДИННОГО РАКЕТНОГО ДВИГУНА ПРИ ЙОГО ЗАПУСКУ

Інститут технічної механіки Національної академії наук України
і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: dolmrut@gmail.com

Незважаючи на комплекс заходів по налаштуванню рідинного ракетного двигуна (РРД) на заданий режим роботи, залишаються мінімальні допустимі розкиди геометричних і режимних параметрів його вузлів і агрегатів (внутрішні фактори), які разом із зовнішніми факторами (тиск і температура компонентів палива на вході в двигун) визначають розкид тяги двигуна. Щоб забезпечити допустимий розкид тяги двигуна відповідно до технічного завдання на двигун, важливо ще на етапі автономного відпрацювання вузлів і агрегатів двигуна знати величину цього розкиду. Метою даної роботи є розробка методики розрахункового визначення впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску.

Розроблено методику визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску. Вона містить розробку математичної моделі запуску двигуна, в якій враховано найбільшу кількість внутрішніх факторів; вибір внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги РРД при його запуску; обрання методу завдання розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів; проведення розрахунків запуску двигуна при різних поєднаннях розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів і визначення розкиду тяги двигуна; визначення статистичних і теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі і оцінка їх узгодженості за допомогою критерію згоди χ^2 Пірсона.

Надано приклад розрахунку впливу розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску, при цьому розглядався маршовий РРД, виконаний за схемою із допалюванням окислювального генераторного газу. За результатами попередніх розрахунків запуску двигуна визначено 12 внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги двигуна при його запуску. Показано, що розрахунковий розкид часу набору 90 % тяги (тиску в камері згоряння) лежить в діапазоні від – 0,0822 с до +0,0730 с. При цьому розрахунковий розкид тяги двигуна (тиску в камері згоряння) на усталеному режимі знаходиться в діапазоні від –6,4 % до +6,6 % від номінальної тяги двигуна. Отримано оцінку узгодженості отриманих статистичних і передбачуваних теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі за допомогою критерію згоди.

Ключові слова: *рідинний ракетний двигун, запуск, математичне моделювання, набір 90 % тяги, зовнішні і внутрішні фактори, розкид тяги, узгодженість статистичного і теоретичного розподілів.*

Despite of the package of measures to adjust a liquid-propellant rocket engine (LPRE) to a specified operating regime, minimum acceptable spreads in the geometrical parameters and operating conditions of its units and assemblies steel remain. These internal factors together with external ones (the pressure and temperature of the propellant components at the engine inlet) govern the engine thrust spread. To provide an acceptable engine thrust spread according to the engine requirements specification, it is important to know the spread value as early as at the stage of off-engine tryout of the engine units and assemblies. The aim of this work is to develop a procedure for calculating the effect of external and internal factors on the LPRE startup thrust spread.

This paper presents a procedure for determining the effect of internal and external factors on the LPRE startup thrust spread. The procedure includes the development of a mathematical model of engine startup that accounts for the maximum number of internal factors, the choice of internal factors that produce the maximum effect on the LPRE startup thrust spread, the choice of a method for specifying the external and internal factor spread, engine startup calculations at different combinations of external and internal factor spread values, engine thrust spread determination, determining the statistical and the theoretical distributions of the 90 percent thrust time spread and the steady thrust spread, and assessing their goodness of fit using Pearson's chi-squared test.

The paper gives an example of calculating the effect of the external and internal factor spread on the LPRE startup thrust spread for a staged-combustion oxidizer-rich sustainer LPRE. Using the results of previous calculations, 12 internal factors that produce the maximum effect on the engine startup thrust spread are identified. It is shown that the calculated spread of the 90 percent thrust (combustion chamber pressure) time lies in the range – 0.0822 s to +0.0730 s about its nominal value, and the calculated steady engine thrust (combustion chamber pressure) spread lies in the range –6.4 percent to +6.6 percent of the nominal thrust. Using Pearson's chi-squared test, an estimate is obtained for the goodness of fit of the anticipated theoretical distributions of the 90 percent thrust time spread and the steady thrust spread to the obtained statistical ones.

Keywords: *liquid-propellant rocket engine, startup, mathematical simulation, 90 percent thrust time, external and internal factors, thrust spread, goodness of fit of a theoretical distribution to a statistical one.*

Вступ. Виготовлення вузлів і агрегатів рідинних ракетних двигунів

(РРД), незважаючи на високий рівень виробництва ракетної техніки [1], здійснюється з певним розкидом геометричних параметрів. Для нівелювання цього розкиду здійснюється настройка РРД, під якою розуміють комплекс розрахунково-експериментальних робіт, що забезпечують отримання заданих параметрів двигуна шляхом визначення характеристик його регулюючих елементів [2]. Необхідні характеристики регулюючих елементів визначають розрахунковим шляхом з використанням результатів гідравлічних проливок, пневматичних випробувань вузлів і агрегатів двигуна, а також результатів його попередніх випробувань.

Незважаючи на комплекс заходів по налаштуванню двигуна на заданий режим роботи, залишаються мінімальні допустимі розкиди геометричних і режимних параметрів вузлів і агрегатів двигуна [2], які і визначають розкиди тяги товарного двигуна. Знання цього розкиду важливо ще на етапі автономного відпрацювання вузлів і агрегатів двигуна для того, щоб забезпечити його допустиму величину відповідно до технічного завдання на двигун.

Для визначення розрахункового розкиду тяги двигуна потрібні математичні моделі, які достовірно описують робочі процеси в двигуні. Якщо потрібно визначення розкиду тяги не тільки на усталеному режимі, але і в процесі запуску двигуна (час набору 90 % тяги), то необхідні математичні моделі, що охоплюють всі значущі низькочастотні динамічні процеси в двигуні при його запуску. Математичні моделі, що дозволяють врахувати кінетику займання і вигоряння палива в газогенераторі і камері згоряння, а також теплофізичні процеси, що протікають в трактах двигуна на початковому етапі запуску, до яких відносяться нагрів, газифікація і конденсація кріогенних компонентів палива, представлені в роботах [3], [4]. Математична модель низькочастотних процесів в регуляторах витрати [3], [5] може бути використана для виконання аналізу стійкості двигуна по відношенню до регуляторних коливань. Врахування в сучасних математичних моделях низькочастотної динаміки РРД таких важливих явищ і процесів, як кавітаційні коливання в системі живлення РРД і динамічна взаємодія двигунів з гідравлічними системами, представлені в роботах [6], [7]. Провідні технології моделювання (пакети прикладних програм) і сучасні математичні моделі динамічних процесів в системах РРД (наприклад, [8] і [9]) дозволяють отримати надійний теоретичний прогноз перехідних процесів в двигуні. Ці технології базуються на використанні термодинамічних характеристик продуктів згоряння в газогенераторі і камері згоряння, отриманих в результаті роботи спеціалізованих комп’ютерних програм (таких як, наприклад, ASTRA [10]).

Метою цієї роботи є розробка методики розрахункового визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску.

1. Математична модель запуску РРД. Математичні моделі запуску РРД, що описують весь перелік істотних низькочастотних динамічних процесів, включають десятки диференціальних і алгебраїчних рівнянь [7]. Такі моделі дозволяють враховувати найбільшу кількість внутрішніх факторів, які пов’язані з динамічними процесами в двигунах. Далі коротко розглянемо найбільш повну математичну модель запуску РРД. Така модель повинна включати рівняння, що описують процес заповнення гідравлічних трактів компонентів палива. На час заповнення трактів визначальний вплив робить вигляд фронту заповнення [3], [4], який визначається виходячи з відомих експериментальних даних. У разі кріогенних компонентів палива визначення заповнення гідравлічних трактів істотно ускладнюється [3]. Необхідно враховувати нагрів криогенного компонента палива, його газифікацію і конденсацію, а також охолодження конструкції гідравлічного тракту.

В сучасних маршових РРД з допалюванням генераторного газу часто використовується як привід бустерних насосів газова турбіна, у якій скидання газоподібного робочого тіла здійснюється в потік рідкого (криогенного) компонента палива на вході в основний насос [11]. Наявність конденсованого газоподібного робочого тіла на вході в насос несе потенційну небезпеку виникнення нестійкості робочого процесу як за рахунок можливого порушення стабільності конденсації газоподібного робочого тіла на перехідних процесах, так і в зв’язку з можливою появою кавітаційних автоколивань в гідравлічній системі, що складається з короткого трубопроводу і основного насоса. При математичному моделюванні запуску такого РРД для врахування вдуву газоподібного робочого тіла в потік рідкого компонента палива слід використовувати узагальнені результати експериментальних досліджень процесу конденсації перегрітої пари кисню в потоці рідкого кисню [12, 13].

При дослідженні динамічних процесів в РРД, особливо при запуску, першорядне значення має врахування кавітаційних явищ в насосах РРД [3, 6, 7]. Кавітаційні каверни у вхідній частині шнекового переднасоса, незважаючи на їх порівняно невеликий об’єм, призводять до якісної зміни динамічних характеристик двигуна, зниження власних частот коливань в живлячих гідравлічних магістралях, здійснюють суттєвий вплив на стійкість робочого процесу в РРД. При глибоких і тривалих провалах вхідного тиску, що найчастіше реалізуються при запуску РРД, істотно змінюються характеристики запуску двигуна, в тому числі час набору 90 % тяги двигуна. Тут внутрішні фактори, що впливають на параметри кавітації в насосах, можуть проявитися найбільшою мірою.

Найбільш повною і завершеною математичною моделлю кавітаційних коливань в гідравлічній системі зі шнековідцентровими насосами РРД є гідродинамічна модель [6] з узагальненими експериментально-розрахунковими коефіцієнтами [14, 15], яка включає рівняння динаміки кавітаційних каверн, щодо тиску на вході в насос, і рівняння для визначення тиску на виході з насоса:

$$\left(1+\alpha_p\right)\frac{dp_1}{dt} = \frac{G_1 - G_2}{C_K} + R_{K1}\frac{dG_1}{dt} + R_{K2}\frac{dG_2}{dt},$$

$$p_2 = p_1 + p_H \cdot \tilde{p}_H\left(\tilde{V}_K\right) - J_H\frac{dG_2}{dt},$$

де p_1, G_1 – тиск і витрата рідини на вході в насос; t – час; p_2, G_2 – тиск і витрата рідини на виході з насоса; p_H, $\tilde{p}_H\left(\tilde{V}_K\right)$ – напір і кавітаційна функція насоса; $\tilde{V}_K = V_K / V_{Ш\,CP}$ – відносний об’єм кавітаційних каверн; $V_{Ш\,CP}$ – об’єм проточної частини шнека, де розташовані каверни перед кавітаційним зривом: $V_{Ш\,CP} \approx 2{,}3 \cdot s \cdot (D_H^2 - d_{BT}^2)/4$ [8]; D_H – зовнішній діаметр шнека; d_{BT} – діаметр втулки шнека; s – крок гвинтової лінії шнека; J_H – коефіцієнт інерційного опору рідини в проточній частині насоса; $\alpha_p = \frac{\partial\left(B_1 T_K\right)}{\partial p_1}\left(G_1 - G_2\right)$; $C_K = -\frac{\gamma}{B_1}$ – податливість каверн; R_{K1}, R_{K2} – коефіцієнти, що мають розмірність кавітаційного опору B_2: $R_{K1} = B_2 - \frac{B_1 \cdot T_K}{\gamma} + \frac{\partial p_{CP}}{\partial G_1} - \frac{\partial (B_1 T_K)}{\partial G_1} (G_1 - G_2)$, $\qquad R_{K2} = \frac{B_1 \cdot T_K}{\gamma}$; $B_2(p_1, G_1) = \frac{\partial p_1}{\partial G_1}$; B_1, T_K – пружність і постійна часу кавітаційних каверн; γ – питома вага рідини; p_{CP} – тиск зриву насоса.

Системи живлення РРД можуть включати протяжні розгалужені трубопроводи. Для математичного моделювання низькочастотної динаміки таких систем живлення може бути рекомендований методичний підхід [16], який передбачає послідовне вирішення таких задач: побудова лінійної математичної моделі динаміки гідравлічного тракту, що розглядається як система з розподіленими параметрами, і визначення її частотних характеристик; наближену заміну цієї системи системою з зосередженими параметрами, що побудовано з кінцевих гідродинамічних елементів, яка здійснюється на основі узгодження частотних характеристик цих двох систем; побудова нелінійної математичної моделі низькочастотної динаміки гідравлічного тракту, яка використовується при розрахунку запуску РРД.

Регулятор витрати пального на газогенератор має визначальне значення для завдання і підтримки необхідної потужності турбонасосного агрегату і, отже, тяги двигуна. Тому розкид конструктивних і режимних параметрів регулятора витрати може істотно вплинути на розкид тяги РРД при його запуску. Для математичного моделювання динамічних процесів в регуляторі витрати пального при запуску розроблена математична модель, представлена в роботі [17].

РРД, виконані за схемою з допалюванням генераторного газу, мають більш високий питомий імпульс тяги в порівнянні з двигунами без допалювання. Тому вони широко поширені в даний час і мають перспективи ще більшого поширення в майбутньому. Однак в самій схемі таких двигунів закладена небезпека виникнення специфічних низькочастотних коливань, відсутніх в РРД без допалювання генераторного газу. Ці коливання пов’язані з транспортним запізненням продуктів згоряння в газогенераторі і газоводі ^{2}, а також з інерційністю вала турбонасосного агрегату J ($J - ^{2}$ – контурні коливання). Вони можуть реалізуватися при запуску двигуна на перехідному або усталеному режимах роботи.

В роботі [18] описаний нестійкий режим роботи двигуна по відношенню до $J - ^{2}$ – контурних коливань при вогневих випробуваннях РРД РД 191 на глибоко дроссельованому режимі роботи (30 % номінальної тяги). Як показано в роботі [19], при великих значеннях часу перебування газу в газових трактах РРД (який мав місце при цих випробуваннях) зростає ризик динамічної нестійкості двигуна, яка обумовлена нестійкістю коливань цього виду.

При розрахунковому визначенні впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги РРД з допалюванням генераторного газу при його запуску математична модель запуску двигуна повинна коректно описувати $J - ^{2}$ – контурні коливання. Для цього необхідно здійснювати урахування запізнювань, обумовлених неізотермічністю процесів в елементах газового тракту РРД (часу перебування продуктів згоряння в газових трактах), і запізнювань, обумовлених затримкою перетворення рідких компонентів палива в газоподібні (запізнювань газоутворення). У роботах [20] – [22] встановлено, що визначальний вплив на частотні характеристики двигуна і перехідні процеси при його запуску має час перебування газу в газогенераторі $^{2}{}^{ГГ}_{П}$ і газоводі $^{2}{}^{ГВ}_{П}$, а також запізнювання газоутворення в газогенераторі $\tau_З^{ГГ}$. Вплив запізнювань при описі низькочастотної динаміки камери згоряння – як часу перебування $\tau_П^К$, так і запізнювання газоутворення $\tau_З^К$ – є незначним і може не враховуватися. У цих роботах запропоновано також схеми наближеної заміни рівняння ланки запізнювання $y(t) = x(t-\tau)$ звичайними диференціальними рівняннями. Ці схеми побудовані на основі апроксимації передавальної функції ланки запізнювання $W_e(p\tau) = \exp(-p\tau)$ дробово-раціональними функціями від $p\tau$ (тут p – комплексна змінна перетворення Лапласа при нульових початкових умовах; τ – час запізнювання). Показано, що для малих значень τ (таких, як $\tau_З^{ГГ}$) в якості апроксимувальної дробово-раціональної функції може бути використаний дробовий ряд Тейлора 1-го порядку. Для апроксимації передавальних функцій ланок запізнювання в рівняннях динаміки газогенератора і газовода (з запізнюваннями $\tau_П^{ГГ}$ і $\tau_П^{ГВ}$) рекомендовані дві дробово-раціональні функції: функція $R_{n(T02)}(p\tau) = [T_{0,2}(p\tau/2)]^2 = 1/(1 + p\tau/2 + 0{,}125p^2\tau^2)^2 \approx W_e(p\tau)$, яку отримують при заміні ланки запізнювання ланцюжком з двох коливальних ланок з удвічі меншими запізнюваннями [21], і функція $W_e(p\tau) \approx P_{1,2}(p\tau) = \left(1 - p\tau/3\right)/(1 + 2p\tau/3 + p^2\tau^2/6)$, побудована з використанням методу Паде [22]. Апроксимація функціями $R_{n(T02)}(p\tau)$ і $P_{1,2}(p\tau)$ дозволяє отримати прийнятні результати розрахунків запуску РРД для значень $\mu\tau \le 3$ (де μ – кутова частота коливань).

У безгенераторних схемах РРД [23], як і в схемі РРД з допалюванням генераторного газу, є аналогічні внутрішньодвигунні контури коливань. Так, у схемі з відбором газу на турбіну з камери згоряння коливальний контур утворюють турбонасосний агрегат (ТНА) і газовий тракт від камери згоряння до турбіни. При схемі з живленням турбіни одним компонентом палива (після його газифікації в сорочці охолодження в камері згоряння) в коливальний контур входить ТНА і ділянка тракту газифікованого компонента, де знаходиться газ.

2. Визначення зовнішніх і внутрішніх факторів. За сукупністю основних параметрів, прийнятих конструктивних рішень, особливостей реалізації робочого процесу на основному і перехідному режимах і за багатьма іншими показниками кожен двигун є унікальним. Набір внутрішніх факторів для кожного двигуна у зв’язку з його особливостями також є унікальним. До переліку внутрішніх факторів, зазвичай, входять [2]: зміна гідравлічних опорів трактів на газогенератор і камеру згоряння, коливання значень діаметра критичного перетину камери згоряння, відхилення значень діаметра критичних перетинів сопел турбіни. Цей список може бути доповнений розкидами к. к. д. турбін і насосів, відхиленнями напорів насосів окислювача і пального, коливаннями значень температур в вогневих просторах газогенератора і камери згоряння.

На розкид тяги двигуна при його запуску також впливає розкид часів відкриття клапанів окислювача і пального на газогенератор і камеру згоряння. Крім того, на динамічні характеристики запуску РРД впливає розкид коефіцієнтів математичної моделі динамічних процесів при запуску. Серед цих коефіцієнтів слід виділити час затримки газоутворення в газогенераторі, час перебування продуктів згоряння в газогенераторі і газоводі, коефіцієнти податливості рідини в гідравлічних трактах окислювача і пального.

Представлений список внутрішніх факторів є неповним. Повний список може бути дуже громіздким, що суттєво ускладнює визначення впливу внутрішніх факторів на розкид тяги двигуна. Однак слід зазначити, що серед усіх внутрішніх факторів можна виділити такі, які слабо (в порівнянні з іншими) впливають на розкид тяги двигуна при його запуску. У першому наближенні такі фактори можна не враховувати. Для визначення внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги РРД при його запуску, необхідно провести серію попередніх розрахунків запуску двигуна, в яких по черзі варіюються внутрішні фактори в межах їх розбросів і визначаються відхилення досліджуваної характеристики, наприклад, часу набору 90 % тяги. Далі відбираються ті внутрішні фактори, у яких величини відхилень найбільші.

До зовнішніх факторів відносять [2] температуру навколишнього середовища, яка впливає на зміну фізичних властивостей компонентів палива (в'язкість, густина, теплоємність тощо), і тиск на вході в насоси (двигун). Для компонентів палива зі стабілізованою температурою і кріогенних компонентів палива в якості зовнішнього фактора слід використовувати температуру компонентів палива.

3. Завдання розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів. Нехай математична модель низькочастотних динамічних процесів запуску РРД містить n зовнішніх і внутрішніх факторів $\sim_1,\ldots,\sim_n$, які надають найбільший вплив на розкид тяги двигуна при його запуску. Множина точок A_i з декартовими координатами $\sim_{1,i},\ldots,\sim_{n,i}$ утворює n-мірний простір параметрів. Насправді значення параметрів $\sim_1,\ldots,\sim_n$ змінюються в обмежених межах і належать допустимій множині $\mathbf{P}$, що представляє собою n-мірну область простору параметрів:

$$\mathbf{P} = \{\sim_1,\ldots,\sim_n :\ \sim_j^{\min} \le \sim_j \le \sim_j^{\max},\quad j = 1,\ldots,n\}. \qquad (1)$$

Прямий підхід до визначення розкиду тяги РРД при його запуску полягає в реалізації різноманітних поєднань значень зовнішніх і внутрішніх факторів з допустимої множини (1). Зовнішні та внутрішні фактори можуть бути обрані на основі випадкового пошуку, при цьому пошук буде тим ефективнішим, чим більш рівномірно розташовані в просторі параметрів значення зовнішніх і внутрішніх факторів [24]. В обох випадках рішення задачі визначення розкиду тяги двигуна при його запуску за рахунок розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів вимагає великого обсягу обчислень і є досить трудомістким навіть при відносно малій кількості варійованих параметрів.

Для вибору пробних точок $\sim_1,\ldots,\sim_n \in \mathbf{P}$ пропонується використовувати метод зондування простору, який називається ЛП-пошуком. Цей метод реалізується для одиничного n-мірного куба K^n. В якості пробних точок в одиничному n-вимірному кубі використовуються точки ЛП$_\tau$-послідовностей. ЛП$_\tau$-послідовності є найбільш рівномірно розподіленими серед усіх відомих в даний час послідовностей. Їх використання має перевагу в порівнянні з найпростішим випадковим пошуком і значно ефективніше рівномірних кубічних решіток при [24].

Різні поєднання відхилень кожного з зовнішніх і внутрішніх факторів визначають різні «набори» значень варійованих параметрів для розрахунку запуску. «Набори» відхилень параметрів, приведених до безрозмірного вигляду, визначалися ЛП$_\tau$-послідовностями, які будувалися в одиничному кубі K^n відповідно до [24]. Використання ЛП$_\tau$-послідовностей дозволяє при меншій кількості реалізацій рівномірно охопити відхилення параметрів від їх номінальних значень, при цьому кількість реалізацій рекомендується вибирати кратним 2. В роботі [24] представлено алгоритм розрахунку, а в статті [15] – приклад розрахунку таблиці з ЛП$_\tau$-послідовністю. Кожен рядок таблиці визначає координати ($x_1, x_2, \ldots, x_n$) однієї точки n-мірного одиничного куба і задає один з варіантів реалізації відхилень зовнішніх і внутрішніх факторів. Кожен стовпець таблиці

Таблиця – Внутрішні фактори для тестового двигуна

№	Назва фактора	Границі зміни, %	варіант min тяги	варіант max тяги
			відхилення від номіналу, %	
1	Втрати тиску в лінії окислювача на газогенератор	$\pm$ 4,8	69	72
2	Температура в газогенераторі	$\pm$ 3,9	-56	91
3	Температура в камері згоряння	$\pm$ 3,4	-69	3
4	Площа соплового апарата турбіни	$\pm$ 2	6	-47
5	К. к. д. турбіни	$\pm$ 5	-81	91
6	Напір насоса окислювача	$\pm$ 2	-44	91
7	К. к. д. насоса окислювача	$\pm$ 1,3	19	-3
8	Напір насоса пального I ступеня	$\pm$ 2	6	-97
9	К. к. д. насоса пального I ступеня	$\pm$ 3	31	-3
10	Час перебування продуктів згоряння в газогенераторі	$\pm$ 20	-69	-22
11	Початкове підтискання пружини золотника регулятора витрати пального	$\pm$ 10	-81	66
12	Час відкриття клапана пального на газогенератор	$\pm$ 20	-81	84

задає одну координату x_i точки в n-мірному одиничному кубі для всіх варіантів реалізацій відхилень зовнішніх і внутрішніх факторів.

4. Приклад розрахунку. Нижче представлено приклад розрахунку впливу розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску. В якості тестового був використаний маршовий РРД, виконаний за схемою з допалюванням окислювального генераторного газу, представлений в роботі [15]. В результаті попередніх розрахунків запуску двигуна було визначено 12 внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги двигуна при його запуску. Перелік цих факторів і межі їх зміни представлені в таблиці.

Десять факторів у складі представлених визначають статичні характеристики двигуна і впливають як на час набору 90 % тяги, так і на тягу двигуна на усталеному режимі роботи. Два фактори (час перебування продуктів згоряння в газогенераторі і час відкриття клапана пального на газогенератор) впливають тільки на час набору 90 % тяги двигуна. В якості зовнішніх факторів прийняті тиск і температура компонентів палива на вході в двигун.

Використовуючи математичну модель запуску тестового двигуна і відпо-

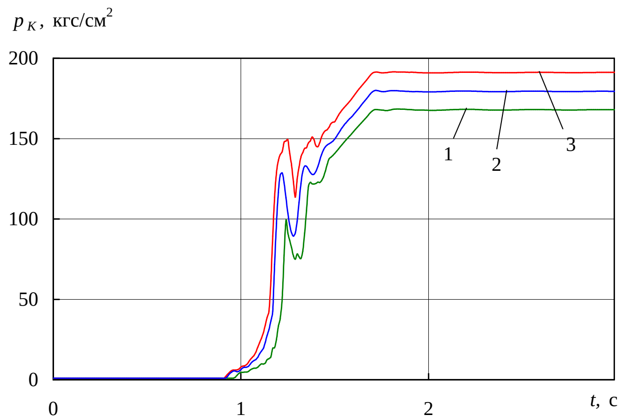

Рис. 1 – Розрахункові залежності тиску в камері згоряння від часу при запуску тестового двигуна: 1 – нижня огинаюча; 2 – залежність при номінальних значеннях параметрів; 3 – верхня огинаюча

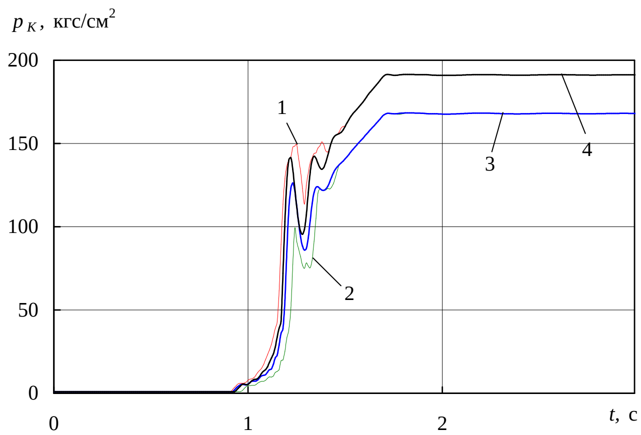

Рис. 2 – Розрахункові залежності тиску в камері згоряння від часу при запуску тестового двигуна: 1 – верхня огинаюча; 2 – нижня огинаюча; 3, 4 – розрахунки при максимальному зменшенні та максимальному збільшенні тяги двигуна, відповідно

відно до викладеного вище методом рівномірного завдання відхилень зовнішніх і внутрішніх факторів, були проведені серії розрахунків запуску тестового двигуна (одна серія включала $256=2^8$ розрахунків запуску при різних поєднаннях розкидів зовнішніх і внутрішніх факторів). На рисунку 1 представлені розрахункові залежності тиску в камері згоряння від часу при запуску тестового двигуна. Розрахунковий розкид часу набору 90 % тяги t_{90} (тиску в камері згоряння) лежить в діапазоні від -0,0822 с до +0,0730 с. При цьому розрахунковий розкид тяги двигуна (тиску в камері згоряння) на усталеному режимі знаходиться в діапазоні від -6,4 % до +6,6 % щодо номінальної тяги двигуна. На рисунку 2 представлені розрахункові залежності тиску в камері згоряння від часу при запуску тестового двигуна з такими варіантами поєднань розкидів зовнішніх і внутрішніх факторів, коли реалізується мінімальне і максимальне значення тяги двигуна. Ці варіанти поєднань розкидів зовнішніх і внутрішніх факторів представлені в таблиці. І хоча при цьому деякі внутрішні чинники приймають значення близькі до граничних, зробити прогноз максимального розкиду тяги двигуна за цими граничним значенням внутрішніх факторів не уявляється можливим.

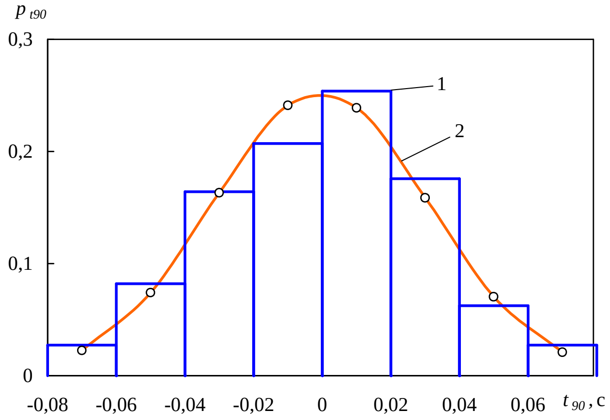

Рис. 3 – Статистичний (1) та теоретичний (2) розподіл розкиду часу t_{90}

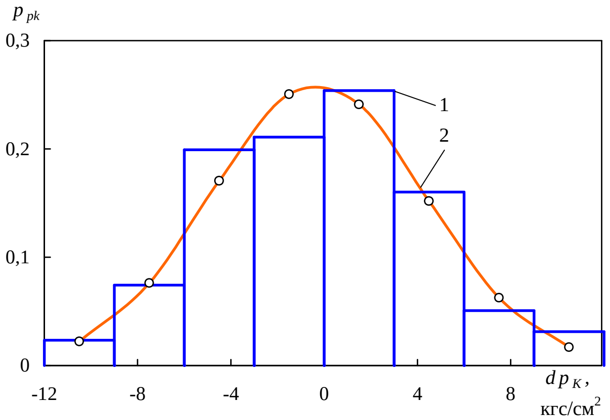

Рис. 4 – Статистичний (1) та теоретичний (2) розподіл розкиду тиску в камері згоряння dp_K

Значення розкиду часу набору 90 % тяги двигуна t_{90} і значення розкиду тяги двигуна, визначені описаним вище способом, є псевдовипадковими величинами. Зробимо оцінку узгодженості отриманих статистичних і передбачуваних теоретичних (нормальних) розподілів за допомогою критерію згоди ¡^{2} Пірсона. Для цього отримані вибірки значень часу t_{90} і тяги двигуна на усталеному режимі розмістимо в 8 розрядах і побудуємо гістограми (див. рис. 3 і 4, цифра 1). Теоретична ймовірність попадання випадкової величини в довільний розряд (крива 2, рис. 3 і 4), як зазвичай прийнято [25], оцінюється за допомогою дослідних статистичних характеристик: математичного очікування $\hat{M}$ і дисперсії $\hat{D}$. Міра розбіжності статистичного і теоретичного розподілів відповідно до критерію згоди склала ¡^{2} = 3,18 і ¡^{2} = 6,85, відповідно до часу t_{90} і тяги двигуна на усталеному режимі. Ці значення не перевищили критичне значення ¡$^2_{кр}$ = 11,1, що підтверджує гіпотези про узгодженість статистичних і теоретичних розподілів для часу набору 90 % тяги двигуна і тяги двигуна на усталеному режимі.

Висновки. Розроблено методику визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги РРД різних схем при їх запуску, яка включає:

– розробку математичної моделі запуску двигуна, в якій ураховано найбільшу кількість внутрішніх факторів;

– вибір внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги РРД при його запуску;

– обрання методу завдання розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів;

– проведення розрахунків запуску двигуна при різних поєднаннях розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів і визначення розкиду тяги двигуна;

– визначення статистичних і теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі;

– оцінку узгодженості отриманих статистичних і передбачуваних теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі за допомогою критерію згоди ¡^{2} Пірсона.

Надано приклад розрахунку впливу розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид часу набору 90 % тяги двигуна на розкид тяги РРД при його запуску, при цьому розглядався маршовий РРД, виконаний за схемою з допалюванням окислювального генераторного газу. Визначено 12 внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги двигуна при його запуску. Показано, що розрахунковий розкид часу набору 90 % тяги (тиску в камері згоряння) лежить в діапазоні від – 0,0822 с до +0,0730 с. При цьому розрахунковий розкид тяги двигуна (тиску в камері згоряння) на усталеному режимі знаходиться в діапазоні від – 6,4 % до +6,6 % від номінальної тяги двигуна. Проведено оцінку узгодженості отриманих статистичних і передбачуваних теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі за допомогою критерію згоди ¡^{2} Пірсона.

Отримані результати можуть бути використані для теоретичного визначення розкиду тяги РРД в залежності від зовнішніх і внутрішніх факторів на різних етапах розробки двигуна.

1. *Гахун Г. Г., Баулин В. И., Володин В. А., Курпатенков В. Д., Краев М. В., Трофимов В. Ф.* Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
2. *Махин В. А., Присняков В. Ф., Белик Н. П.* Динамика жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 834 с.
3. *Шевяков А. А., Калнин В. М., Науменкова М. В., Дятлов В. Г.* Теория автоматического управления ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.
4. *Беляев Е. Н., Черваков В. В.* Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
5. *Лебединский Е. В., Зайцев Б. В., Соболев А. А.* Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД. 2011. С. 10. http://www.lpre.de/resources/articles/reg_model.pdf (дата звернення 05.10.2021).
6. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С.* Кавитационные колебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение. 1977. 352 с.
7. *Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н., Николаев А. Д., Хоряк Н. В.* Особенности математического моделирования низкочастотной динамики маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа при запуске. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23, № 5. С. 3–12. https://doi.org/10.15407/knit2017.05.003

8. *Liu Wei, Chen Liping, Xie Gang, Ding Ji, Zhang Haiming, Yang Hao* Modeling and Simulation of Liquid Propellant Rocket Engine Transient Performance Using Modelica. Proc. of the 11th Int. Modelica Conf., 2015, Sept. 21–23, Versailles. France. P. 485–490. https://doi.org/10.3384/ecp15118485
9. *Di Matteo, Fr., De Rosa, M., Onofri, M*. Start-Up Transient Simulation of a Liquid Rocket Engine. AIAA 2011-6032 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (31 July – 03 August 2011). San Diego. California. 15 p. https://doi.org/10.2514/6.2011-6032
10. *Белов Г. В.* Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем. Математическое моделирование. 2005. Т. 17, № 2. С. 81–91.
11. *Дегтярев А. В.* Ракетная техника. Проблемы и перспективы. Днепропетровск.: АРТ-ПРЕСС. 2014. 420 с.
12. *Пилипенко В. В., Дорош Н. Л., Манько И. К.* Экспериментальные исследования конденсации пара при вдуве струи газообразного кислорода в поток жидкого кислорода. Техническая механика. 1993. Вып. 2. С. 77–80.
13. *Дорош Н. Л.* Моделювання конденсації струменя пари кисню у рідині кисню. Прикладні питання математичного моделювання. 2020. Т. 3, № 2.2. С. 149–155. https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-2.14
14. *Пилипенко В. В., Долгополов С. И.* Экспериментально-расчетное определение коэффициентов уравнения динамики кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах различных типоразмеров. Техническая механика. 1998. № 8. С. 50–56. https://doi.org/10.1016/S0262-1762(99)80457-X
15. *Пилипенко О. В., Долгополов С И., Николаев А. Д., Хоряк Н. В.* Математическое моделирование запуска многодвигательной жидкостной ракетной двигательной установки. Техн. механіка. 2020. № 1. С. 5–19. https://doi.org/10.15407/itm2020.01.005
16. *Долгополов С. И., Заволока А. Н., Николаев А. Д., Свириденко Н. Ф., Смоленский Д. Э.* Определение параметров гидродинамических процессов в системе питания космической ступени при остановах и запусках маршевого двигателя. Техническая механика. 2015. № 2. С. 23–36.
17. *Долгополов С. И., Николаев А. Д.* Математическое моделирование низкочастотной динамики регулятора расхода жидкости при различных амплитудах гармонического возмущения. Техническая механика. 2017. № 1. С. 15–25. https://doi.org/10.15407/itm2017.01.015
18. *Гемранова Е. А., Колбасенков А. И., Кошелев И. М., Левочкин П. С., Мартиросов Д. С.* Способы подавления низкочастотных колебаний в ЖРД на режимах глубокого дросселирования. Труды НПО «Энергомаш» им. академика В. П. Глушко (Химки). 2013. № 30. С. 104–110.
19. *Хоряк Н. В., Николаев А. Д.* Декомпозиция и анализ устойчивости динамической системы “питающие магистрали – маршевый ЖРД с окислительной схемой дожигания генераторного газа”. Техническая механика. 2007. № 1. С. 28–42.
20. *Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Хоряк Н. В., Николаев А. Д., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н.* Математическое моделирование и анализ устойчивости низкочастотных процессов в маршевом ЖРД с дожиганием генераторного газа. Вестник двигателестроения. 2017. № 2. С. 34–42.
21. *Хоряк Н. В., Долгополов С. И.* Особенности математического моделирования динамики газовых трактов в задаче об устойчивости низкочастотных процессов в жидкостных ракетных двигателях. Техн. механіка. 2017. № 3. С. 30–44. https://doi.org/10.15407/itm2017.03.030
22. *Пилипенко О. В., Хоряк Н. В., Долгополов С И., Николаев А. Д.* Математическое моделирование динамических процессов в гидравлических и газовых трактах при запуске ЖРД с дожиганием генераторного газа. Техн. механіка. 2019. № 4. С. 5–20. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.005
23. *Casiano M. J., Hulka J. R., Yang V.* Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review. Journal of Propulsion and Power. 2010. Vol. 26, No. 5. C. 897–923. https://doi.org/10.2514/1.49791
24. *Соболь И. М., Статников Р. Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
25. *Бендит Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М. : Мир, 1974. 464 с.

Отримано 21.10.2021,
в остаточному варіанті 19.11.2021