УДК 532.528:621 https://doi.org/10.15407/itm2022.02.047

С. І. ДОЛГОПОЛОВ

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВНУТРІШНІХ ТА ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА РОЗКИД ТЯГИ ДВИГУННОЇ УСТАНОВКИ, ЩО СКЛАДАЄТЬСЯ ЗІ ЗВ'ЯЗКИ КІЛЬКОХ ДВИГУНІВ

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

Розкид тяги кожного рідинного ракетного двигуна в автономному виконанні за рахунок зовнішніх (тиск і температура компонентів палива на вході в двигун) і внутрішніх факторів (розкиди геометричних і режимних параметрів вузлів і агрегатів двигуна) є відомим з експериментальних випробувань або може бути розраховано за відомою методикою. Зазвичай рідинні ракетні двигунні установки (РРДУ) нижчих ступенів ракет-носіїв включають зв'язку з кількох двигунів, розкид тяги яких часто неможливо визначити за результатами вогневих випробувань через обмежені можливості стендового обладнання. Метою роботи є розвиток методичного підходу до визначення розкиду тяги РРДУ, що складається зі зв'язки двох і більше двигунів.

Для багатодвигунної установки цей методичний підхід додатково передбачає розробку математичної моделі взаємодії двигунів у складі РРДУ, а також проведення розрахунків запуску РРДУ при різних поєднаннях розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів у випадках, коли розкиди параметрів у всіх двигунів як однакові, так і різні.

Для РРДУ, до складу якої входять два двигуни з загальним трубопроводом живлення окислювача, надано приклад розрахунку впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги як кожного з двигунів, так і РРДУ в цілому при запуску цієї установки. Показано, що розрахунковий розкид часу набору 90 % тяги (тиску в камері згоряння) лежить в діапазоні від – 0,0917 с до + 0,0792 с (двигун № 1) і від – 0,0941 с до + 0,0618 с (двигун № 2). При цьому розрахункові значення відхилення тиску в камері згоряння (тяги двигуна) від його номінального значення змінюються у межах від – 6,2 % до + 7,0 % (двигун № 1) і від –6,8 % до +6,3 % (двигун № 2). Визначено граничні відхилення розрахункових розкидів часу набору 90 % тяги і тяги для всієї двигунної установки, які є значно меншими (приблизно на 40 %) і знаходяться в інтервалі (– 0,0733 с, +0,0457 с) для часу і в інтервалі (– 4,8 %, +4,8 %) для тяги (відносно номинальної тяги двигуна). Проведено оцінку узгодженості отриманих статистичних і передбачуваних теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги і розкиду тяги на усталеному режимі як обох двигунів, так і РРДУ в цілому за допомогою критерію згоди ¡ ^{2} Пірсона.

Ключові слова: *рідинна ракетна двигунна установка, зв'язка двигунів, запуск, математичне моделювання, зовнішні і внутрішні фактори, розкид тяги, узгодженість статистичного і теоретичн*ого *розподілів.*

1. *Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф. , Тишин А. П.* Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980. 533 с.
2. *Беляев Е. Н., Черваков В. В.* Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
3. *Махин В. А., Присняков В. Ф., Белик Н. П.* Динамика жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 834 с.
4. *Пилипенко О. В., Долгополов С. І., Хоряк Н. В., Ніколаєв О. Д.,* Методика визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги рідинного ракетного двигуна при його запуску. Техн. механіка. 2021. № 4. С. 7–17. https://doi.org/10.15407/itm2021.04.007
5. *Шевяков А. А., Калнин В. М., Науменкова М. В., Дятлов В. Г.* Теория автоматического управления ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.
6. *Беляев Е. Н., Черваков В. В.* Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
7. *Лебединский Е. В., Зайцев Б. В., Соболев А. А.* Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД. 2011. С. 10. URL: http://www.lpre.de/resources/articles/reg_model.pdf. 26.10.2021
8. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С.* Кавитационные колебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение, 1977. 352 с.
9. *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.
10. *Долгополов С. И.* Гидродинамическая модель кавитационных колебаний для моделирования динамических процессов в насосных системах при высоком кавитационном числе. Техническая механика. 2017. № 2. С. 12–19. https://doi.org/10.15407/itm2017.02.012
11. *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
12. *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

13. *Белов Г. В.* Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем. Математическое моделирование. 2005. Т. 17, № 2. С. 81–91.
14. *Блехман И. И.* Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
15. *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
16. *Dolgopolov S. I., Nikolayev O. D., Khoriak N. V.* Dynamic interaction between clustered liquid propellant rocket engines under their asynchronous start-ups. Propulsion and Power Research. 2021. 10(4). P. 347–359. https://doi.org/10.1016/j.jppr.2021.12.001
17. *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.
18. *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
19. *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.
20. *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
21. *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
22. *Гликман Б. Ф.* Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 396 с.
23. *Чарный И. А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: ГИТТЛ, 1961. 253 с.
24. *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.
25. *Соболь И. М., Статников Р. Б.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
26. *Бендит Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.

Отримано 05.04.2022,
в остаточному варіанті 06.06.2022