УДК 621.454.2 https://doi.org/10.15407/itm2020.01.005

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

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАПУСКУ БАГАТОДВИГУННОЇ РІДИННОЇ РАКЕТНОЇ ДВИГУННОЇ УСТАНОВКИ

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

Вимоги щодо зниження вартості, термінів розробки і виробництва рідинних ракетних двигунів (РРД) часто приводять до рішення використовувати в маршових рідинних ракетних двигунних установках (РРДУ) ракет-носіїв в'язку декількох двигунів, відпрацьованих автономно. Це відкриває перспективи забезпечення необхідної тяги маршових РРДУ за рахунок включення у в'язку необхідної кількості двигунів. При використанні маршових РРДУ, до складу яких входить кілька двигунів, виникають додаткові проблеми, пов'язані з неодночасним вступом двигунів в роботу. Ця неодночасність може порушити роботу окремих РРД, які вступають в роботу з затримкою, або створити перекидальний момент при відриві ракети від пускового столу. Мета цієї роботи – дослідження динамічних процесів при запуску багатодвигунної РРДУ, яка складається з чотирьох РРД із допалюванням окислювального генераторного газу, з урахуванням можливості їхнього неодночасного вступу в роботу. Розроблено математичну модель і проведено розрахунки запуску даної багатодвигунної РРДУ. Показано, що на відміну від випадку, коли усі двигуни двигунної установки вступають в роботу одночасно, при наявності зміщень моменту початку запуску двигунів є можливими глибокі затяжні провали витрати палива на вході в двигуни, які супроводжуються глибокими затяжними провалами тиску на вході в двигуни. Ці явища здатні викликати кавітаційний зрив одного або декількох насосів, що може порушити роботу всієї двигунної установки і призвести до аварійної ситуації. Результати математичного моделювання запуску багатодвигунної РРДУ, виконаного для двигунної установки, що розглядвється, показали, що характер і ступінь впливу зміщення початку запуску двигунів РРДУ на перехідні процеси залежить від безлічі факторів, які визначаються складом РРДУ, її динамічними характеристиками, умовами запуску та ін. Тому для підвищення надійності запуску багатодвигунних РРДУ необхідно в кожному конкретному випадку – для кожної нової або модернізованої РРДУ чи ракети-носія – проводити числові дослідження перехідних процесів при запуску з урахуванням різночасності вступу двигунів в роботу.

Ключові слова: *рідинний ракетний двигун, низькочастотні динамічні процеси, запуск, кавітація в насосах,* система живлення, неодночасність запуску.

1. *Шевяков А. А., Калнин В. М., Науменкова М. В., Дятлов В. Г.* Теория автоматического управления ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.
2. *Беляев Е. Н., Черваков В. В.* Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
3. *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. URL: www.ep.liu.se/ecp/118/052/ecp15118485.pdf от 13.07.2017
4. *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. URL: www.enu.kz/repository/2011/AIAA-2011-6032.pdf. https://doi.org/10.2514/6.2011-6032
5. *Белов Г. В.* Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем. Математическое моделирование. 2005. Т. 17, № 2. С. 81–91.
6. *Лебединский Е. В., Зайцев Б. В., Соболев А. А.* Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД. Сайт ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». 2011. С. 10.
7. *Лебединский Е. В., Калмыков Г. П., Мосолов С. В.* и др.; под ред. *Коротеева А. С.* Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование. М.: Машиностроение. 2008. 512 с.
8. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С.* Кавитационные колебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение. 1977. 352 с.
9. *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
10. Дегтярев *А. В.* Ракетная техника. Проблемы и перспективы. Днепропетровск.: АРТ-ПРЕСС. 2014. 420 с.
11. *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.
12. *Хоряк Н. В., Долгополов С. И.* Особенности математического моделирования динамики газовых трактов в задаче об устойчивости низкочастотных процессов в жидкостных ракетных двигателях. Техническая механика. 2017. № 3. С. 30–44. https://doi.org/10.15407/itm2017.03.030
13. *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. Техническая механика. 2019. № 4. С. 5–20. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.005

14. *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.
15. *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.
16. *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.
17. *Долгополов С. И.* Адаптация гидродинамической модели кавитационных колебаний для моделирования динамических процессов в насосных системах при больших числах кавитации. Техническая механика. 2017. № 2. С. 12–19. https://doi.org/10.15407/itm2017.02.012
18. *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.
19. *Соболь И. М., Статников И. М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука. 1981. 110 с.
20. *Пилипенко В. В., Долгополов С. И.* Математическое моделирование запуска жидкостного ракетного двигателя РД–8 с учетом кавитации в насосах. Техническая механика. 2003. № 2. С. 18–24.

Отримано 10.02.2020,
в остаточному варіанті 25.02.2020