УДК 621.454.2

Н. В. ХОРЯК, С. И. ДОЛГОПОЛОВ

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГАЗОВЫХ ТРАКТОВ В ЗАДАЧЕ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: khoryak@i.ua

Одной из важных задач, возникающих при проектировании жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), является исследование устойчивости низкочастотных процессов в ЖРД методами математического моделирования. В низкочастотном диапазоне динамика большинства элементов ЖРД описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ). Исключение составляют газовые тракты двигателя – камера сгорания, газогенератор и газоводы, процессы в которых описываются уравнениями с запаздываниями. Поскольку причиной низкочастотных колебаний в ЖРД может быть неустойчивость процессов в нескольких различных системах двигателя, при численном исследовании устойчивости необходимо рассматривать ЖРД как многоконтурную динамическую систему с потенциально неустойчивыми подсистемами. Эффективный метод определения устойчивости таких систем в линейной постановке основан на расчете спектра собственных значений матрицы – оператора линейной системы ОДУ, однако этот метод ориентирован на обыкновенные динамические системы. Для того, чтобы применить его при анализе низкочастотной устойчивости ЖРД, необходимо в математической модели динамики газовых трактов перейти от уравнений с запаздываниями к ОДУ. В статье рассмотрена задача учета запаздываний при анализе низкочастотной устойчивости ЖРД по спектру матрицы. Построены схемы приближенной замены уравнений с запаздываниями обыкновенными дифференциальными уравнениями на основе аппроксимации передаточной функции звена запаздывания в области малого параметра дробно-рациональными функциями и цепочками функций. Рассмотрены различные аппроксиманты передаточной функции звена запаздывания и проведен их сравнительный анализ. Предложен рациональный подход к учету запаздываний в уравнениях динамики газовых трактов ЖРД и разработаны методические рекомендации по их учету. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при моделировании низкочастотной динамики газовых трактов и анализе устойчивости низкочастотных процессов в ЖРД.

Ключевые слова: *жидкостной ракетный двигатель, динамическая система, устойчивость по Ляпунову, спектр матрицы, звено запаздывания, передаточная функция, аппроксиманты, частотные характеристики, собственные частоты и декременты колебаний.*

1. *Солнцев В. Л., Радугин И. С., Задеба В. А.* Основные требования к маршевым двигателям перспективных ракет-носителей сверхтяжелого класса с жидкостными ракетными двигателями. Космическая техника и технологии. 2015. № 2(9). С. 25–38.
2. *Гликман Б. Ф.* Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 396 с.
3. *Алемасовв В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П.* Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980. 533 с.
4. *Натанзон М. С.* Продольные автоколебания жидкостной ракеты. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
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. *Oppenheim B. W., Rubin S.* Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets. Journal of Spacecraft and Rockets. 1993. Vol. 30, No. 3. P. 360–383.
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 Proceedings of the 11th International Modelica Conference September 21–23, 2015, Versailles. France. P. 485–490. URL: www.ep.liu.se/ecp/118/052/ecp15118485.pdf от 13.07.2017
9. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение, 1977. 352 с.
10 *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.
11. *Хоряк Н. В.* Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД – корпус РН” по спектру матрицы: методические основы и приложение. Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 9(45). С. 87–91.

12. *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.
13. *Хоряк Н. В., Чернявский О. Е.* К оценке устойчивости систем с запаздываниями по спектру матрицы. Динамика гидросистем энергетических установок летательных аппаратов. К.: Наукова думка, 1991. С. 16–23.
14. *Титов Н. И., Успенский В. К.* Моделирование систем с запаздыванием. Л.: Энергия, 1969. 97 с.
15. *Takahashi S., Yamanaka K., Yamada M.* Detection of dominant poles of systems with time delay by using Pade approximation. Int.J.Control. 1987. Vol. 45. № 1. P. 251–254.
16. *Jang Ching You, Chen Chao-Kuang.* Analysis and parameter identification of time-delay system via Taylor series. Int. J. Systems Sci. 1987. Vol. 18. № 7. P. 1347–1353.
17. *Balchen J. G.* Rational transfer function approximations to transport delay. Modelling, Identification and Control. 1990. Vol. 11. № 3. P. 127–140.
18. Справочник по теории автоматического управления. Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
19. *Атанс М., Фалб П.* Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968. 764 с.
20. *Апресян Л. А.* Аппроксиманты Паде (обзор). Известия вузов (ИВУЗ). Радиофизика. 1979. Т. XXII, № 6. С. 653–674.
21. *Хоряк Н. В.* Аппроксимация экспоненты модифицированным методом Пэйнтера. Прикладные задачи гидрогазодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. К.: Наукова думка, 1989. С. 120–125.
22. *Фихтенгольц Г. М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. 2. М.: Наука, 1970. 800 с.
23. *Репин Ю. М.* О приближенной замене систем с запаздыванием обыкновенными динамическими системами. Прикладная математика и механика. 1965. Т. 29. № 2. С. 229–235.