

УДК 629.786.2:629.7.069

Моделирование движения автоматического свободнолетающего аппарата в герметичном отсеке орбитальной станции

Меркурьев Сергей Александрович¹

sergey.merkurev@rsce.ru

Афони娜 Екатерина Валерьевна¹

ekaterina.afonina3@rsce.ru

Лесник Дмитрий Алексеевич¹

dmitriy.lesnik@rsce.ru

Рулев Дмитрий Николаевич^{1(*)}

dmitry.rulev@rsce.ru

Бесчастнов Игорь Владимирович²

beschastnovigor@gmail.com

¹ ПАО «РКК «Энергия», Королев, Московская обл., Россия² НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается имитационное моделирование движения автоматического свободнолетающего аппарата в герметичном объеме (отсеке) орбитальной космической станции. Особенностью данных условий является перемещение аппарата в воздушной среде при отсутствии тяготения. Рассмотрена базовая схема ориентации векторов тяг и моментов, создаваемых исполнительными органами в связанной с аппаратом системе координат. Составлена система динамических и кинематических уравнений движения аппарата как твердого тела. Результаты моделирования подтверждают управляемость аппарата на типовых полетных траекториях.

Ключевые слова: герметичный отсек космической станции, летательный аппарат, динамика и кинематика твердого тела, имитационное моделирование.

Введение. На американском сегменте Международной космической станции уже используются автоматизированные летательные аппараты с двигателями-импеллерами [1]. Создание автоматического свободнолетающего аппарата для герметичного объема станции сопряжено с необходимостью описания движения летательного аппарата в нетипичном сочетании известных условий: наличия воздушной среды при нормальном атмосферном давлении и условии микрогравитации на низкой околоземной орбите [2].

Материалы и методы; результаты. Рассматривается конфигурация аппарата с двумя центробежными нагнетателями давления во внутренние полости аппарата и 12-ю каналами истечения воздушного потока из них. Управление движением реализуется перекрытием каналов с помощью заслонок. Для описания углового и линейного движения аппарата как твердого тела используется система динамических и кинематических дифференциальных уравнений. Для описания углового движения используются динамические уравнения Эйлера. Система дифференциальных уравнений относительно вектора угловой скорости имеет вид:

$$\dot{\omega} = T^{-1}([T\omega \times \omega] + M_{\text{ext}}), \quad (1)$$

где ω — вектор угловой скорости в связанной системе координат, M_{ext} — вектор момента внешних сил, T — тензор инерции аппарата.

Кинематические уравнения углового движения записаны в кватернионной форме с автоматической коррекцией нормы [3]:

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2}(\Lambda \circ \omega) - \Lambda (\|\Lambda\| - 1), \quad (2)$$

где Λ — кватернион ориентации ССК в инерциальном пространстве.

В динамических уравнениях движения центра масс величина силы аэродинамического сопротивления принималась постоянной для текущего такта интегрирования:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{F} + \mathbf{F}^{aero}(\dot{\mathbf{r}})}{M}, \quad (3)$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор положения аппарата в инерциальном пространстве, $\mathbf{F}$ — вектор внешней силы, прикладываемой к корпусу аппарата, $\mathbf{F}^{aero}$ — мгновенный вектор силы аэродинамического сопротивления, M — масса аппарата.

Имитационное моделирование проводилось в специальной среде, разработанной на базе MathWorks MATLAB [4]. Численное интегрирование выполнялось методом Рунге — Кутты 4-го порядка.

Заключение. Представленная математическая модель движения свободнолетающего аппарата во внутреннем объеме орбитальной космической станции, разработана с учетом сочетания условий микрогравитации и наличия воздушной среды. Данные условия определяют особенности конструкции аппарата, его движения и управления им. Результаты выполненного имитационного моделирования реализации типовых полетных траекторий показывают необходимую управляемость рассмотренного летательного аппарата.

Список источников

- [1] Bualat M.G., Smith T., Fong T.W., Smith E.E., Wheeler D.W. Astrobee: A New Tool for ISS Operations. *15th International Conference on Space Operations*, 2018. <https://doi.org/10.2514/6.2018-2517>
- [2] Носов Д.С., Автайкин С.В., Рулев Д.Н., Калери А.Ю. Исследование управления автономным летающим роботом внутри обитаемой космической станции. *Современные проблемы ракетной и космической техники. LVI Науч. чтения, посв. разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского: сб. ст.* Казань, РИЦ «Школа», 2023, с. 163–181.
- [3] Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. *Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела*. Москва, Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973, 320 с.
- [4] Меркурьев С.А. Методика отработки алгоритмов управления угловым движением космических аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 6. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2020-6-1990>