

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ МКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ОТКАЗОВ В ОДНОМ КАНАЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Крамлих

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

kramlikh@mail.ru

В настоящее время широкое применение находят малоразмерные космические аппараты (МКА) микро- и нанокласса (микроспутники и, в особенности, наноспутники). МКА стали популярными благодаря тому, что их создание, по сравнению с более крупными КА, не требует значительных затрат ресурсов (финансовых и временных), при этом позволяет провести летные испытания как отдельных систем, так и новых технических решений в условиях космического пространства прежде, чем применять их в дорогостоящих космических миссиях. Запуск нескольких МКА, совместно выполняющих целевую задачу в составе группировки, значительно расширяет область их применения [1, 2].

Одной из значимых особенностей МКА является то, что элементы контура управления его угловым движением создаются из неспециализированных, для применения в космосе, комплектующих, которые не отличаются высокой надежностью, поэтому важно повысить надежность контура управления угловым движением, в том числе, за счет формирования программного управления при отказе одного канала управления.

В докладе рассматривается два типа отказа:

- полный отказ, т.е. величина управления в канале равна нулю;
- «зависание», т.е. величина управления в канале принимает некоторое постоянное значение на некотором интервале времени.

Для описания углового движения МКА с помощью нормированного кватерниона q кинематические уравнения имеют вид [3]:

$$2\dot{q} = q \circ \omega \quad (1)$$

а динамические уравнения Эйлера:

$$I\dot{\omega} + \omega \times I\omega = M_a + M_{гр} + U, \quad (2)$$

где $I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z)$ – тензор инерции МКА, $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – вектор абсолютной угловой скорости МКА, M_a – вектор аэродинамического момента, $M_{гр}$ – вектор гравитационного момента, $U = (u_x, u_y, u_z)^T$ – вектор управляющего момента (будем предполагать, что управления как функции времени непрерывны).

Для МКА, угловое движение которого описывается уравнениями (1)-(2) необходимо перевести из некоторого начального положения (3а) в требуемое конечное положение (3б):

$$q(t_0) = q_0, \quad \omega(t_0) = \omega_0 \quad (3a) \quad q(t_k) = q_k, \quad \omega(t_k) = \omega_k \quad (3b)$$

за фиксированный интервал времени $T = t_k$.

В работе [4] было показано, что для решения задачи переориентации можно использовать четные ряды Фурье по сравнению с другими видами функциональных рядов (степенных, тригонометрических, нечетных, Шлемильха).

Задача переориентации МКА с отказавшим каналом управления решается с использованием следующей структуры управления (для каждого из не отказавших каналов):

$$U(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^8 A_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T} + \theta_n\right), \quad (4)$$

где A_n, θ_n – неизвестные параметры, подлежащие определению.

Для отыскания 34 неизвестных параметров A_n, θ_n был использован алгоритм дифференциальной эволюции [5].

Математическое моделирование для оценки работоспособности подхода, в случае полного отказа, проводилось для МКА с характеристиками, приведенными в таблице 1. Высота полета МКА $H = 550$ км.

Таблица 1 – Характеристика МКА

Параметр	Значение
Продольный момент инерции I_x , кгм ²	0,0138481
Поперечный момент инерции I_y , кгм ²	0,0729356
Поперечный момент инерции I_z , кгм ²	0,0714477
Площадь миделя S_m , м ²	0,01
Запас статической устойчивости Δx , м	0,06

Числовые значения краевых условий (3а) – (3б) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Краевые условия задачи

Параметр	Начальное условие	Конечное условие
Вектор угловая скорости ω , °/с	[0,1; 0,1; 0,1]	[0; 0; 0]
Вектор ориентации (углы Эйлера), °	[60; 70; 30]	[1; 1; 179]
Вектор ориентации (кватернионы)	[0,579; 0,579; 0,554; 0,1485]	[0; 1; 0; 0]

Время переориентации $T = t_k = 7100$ с.

Пример результата решения задачи переориентации МКА при отказавшем канале управления показаны на рисунках 1-6.

Характер поведения управления, кватерниона, угловых скоростей и углов при отказе канала по оси Oz аналогичен поведению при отказе по каналу Oy .

Математическое моделирование для оценки работоспособности подхода, в случае «зависания» в канале управления, проводилось для МКА с характеристиками, приведенными в таблице 1. Параметры «зависания» в канале управления приведены в таблице 3.

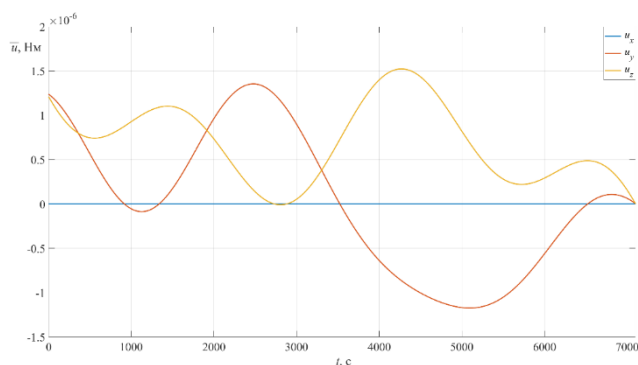


Рисунок 1 – Зависимость управляющих моментов от времени в случае отказа канала по оси Ox

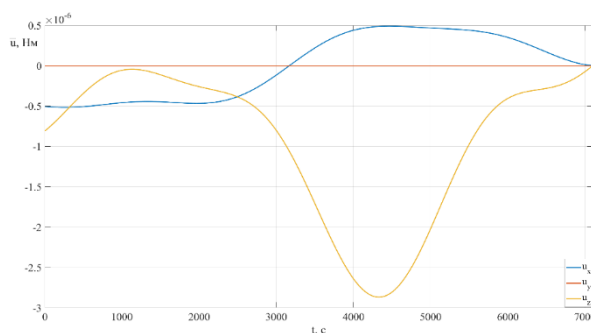


Рисунок 2 – Зависимость управляющих моментов от времени в случае отказа канала по оси Oy

Секция №3. Проблемы динамики и управления движением наноспутников

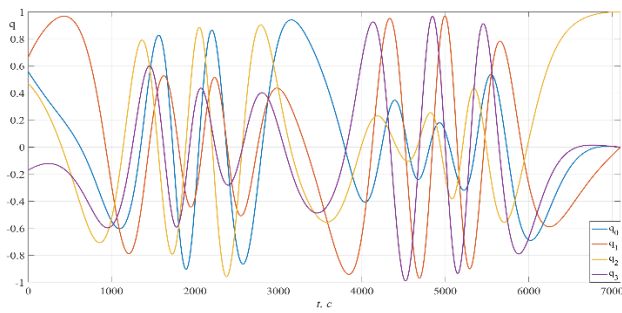


Рисунок 3 – Зависимость компонентов кватерниона от времени в случае отказа канала по оси Ox

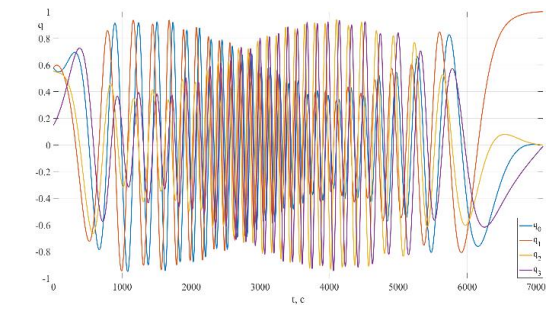


Рисунок 4 – Зависимость компонентов кватерниона от времени в случае отказа канала по оси Oy

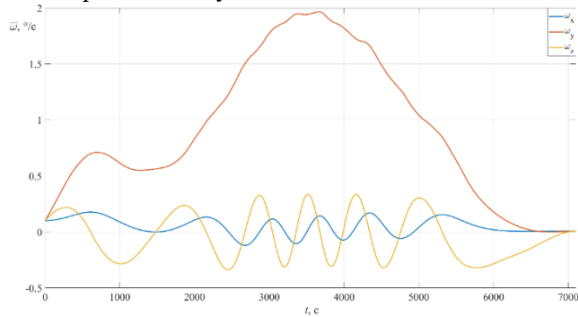


Рисунок 5 – Зависимость компонентов угловой скорости от времени в случае отказа канала по оси Ox

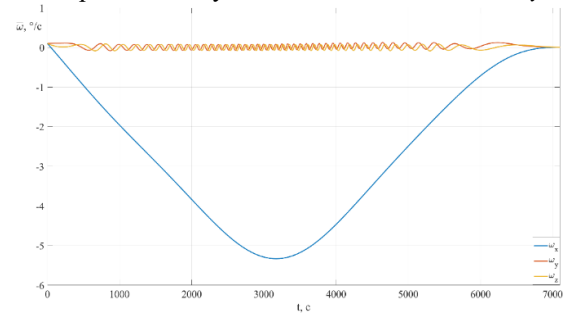


Рисунок 6 – Зависимость компонентов угловой скорости от времени в случае отказа канала по оси Oy

Таблица 3 – Параметры отказов в случае «зависания» в канале управления

Параметр	Значение		
	канал по оси Ox	канал по оси Oy	канал по оси Oz
Время зависания канала $T_{зав}$, с (% от общего времени T)	540 (7,6% от T)	1080 (15,2% от T)	1080 (15,2% от T)
Управляющий момент при зависании $U_{зав}$, Нм (% от максимального U_{max})	$5 \cdot 10^{-7}$ (10% от U_{max})	$1 \cdot 10^{-6}$ (20% от U_{max})	$1 \cdot 10^{-6}$ (20% от U_{max})

Пример результата решения задачи переориентации МКА при отказавшем канале управления показаны на рисунках 7-12.

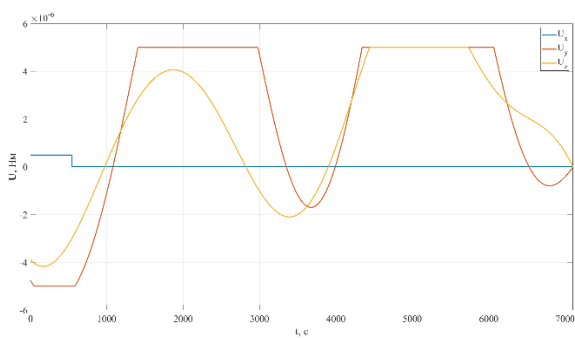


Рисунок 7 – Зависимость управляющих моментов от времени в случае отказа канала по оси Ox

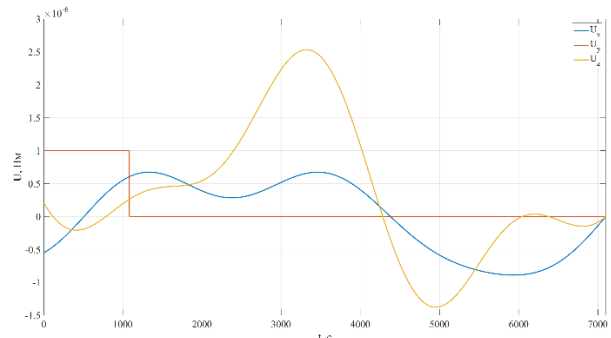


Рисунок 8 – Зависимость управляющих моментов от времени в случае отказа канала по оси Oy

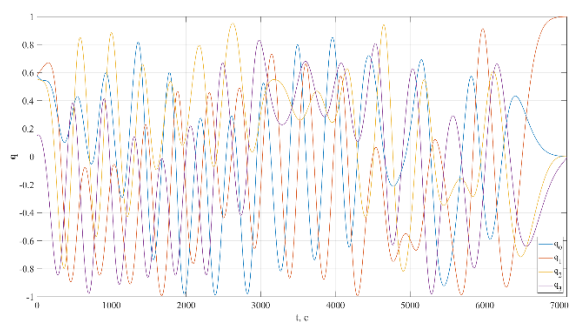


Рисунок 9 – Зависимость компонентов кватерниона от времени в случае отказа канала по оси Ox

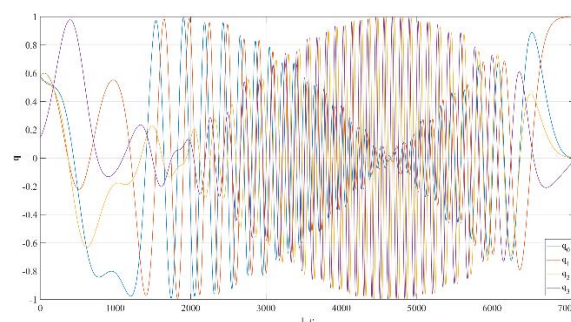


Рисунок 10 – Зависимость компонентов кватерниона от времени в случае отказа канала по оси Oy

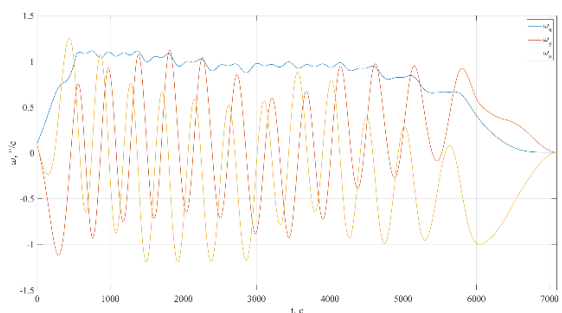


Рисунок 11 – Зависимость компонентов угловой скорости от времени в случае отказа канала по оси Ox

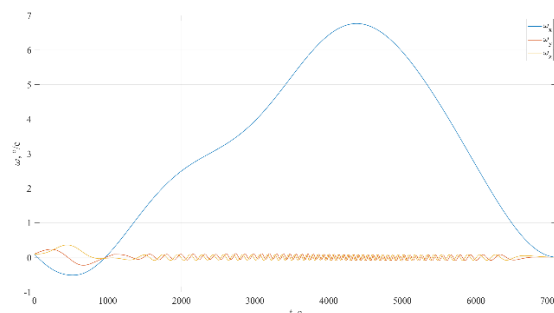


Рисунок 12 – Зависимость компонентов угловой скорости от времени в случае отказа канала по оси Oy

В работе решена задача пространственной переориентации малоразмерного космического аппарата из произвольного начального состояния в требуемое конечное. Программное управление при двух типах отказов одного канала управления получено с использованием четных рядов Фурье. Решение задачи свелось к отысканию 34 коэффициентов четного ряда Фурье, которое было осуществлено с использованием алгоритма дифференциальной эволюции. При времени переориентации порядка 1,5 витка, величина управляющего момента не превысила $6 \cdot 10^{-6}$ Нм, что достижимо для магнитных исполнительных устройств, которые наиболее часто используются для МКА нанокласса стандарта кубсат.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-67-10007, <https://rscf.ru/project/23-67-10007/>

Список литературы:

1. В.Ю. Ключников. Построение кластеров малых космических аппаратов. Изв. вузов. Приборостроение, 59:6 2016. 423-428.
2. М.Ю. Овчинников. Эх, мчится тройка удалая... // Сборник научно-популярных статей - победителей конкурса РФФИ 2012 года, ИТЦ МОЛНЕТ, 16 2013. С. 20-34.
3. В. Н. Бранец, И П. Шмыглевский. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела, 1973. 320 с.
4. An attitude control by the functional series in the problem of nanosatellite reorientation / Elisov N.A., Kramlikh A.V., Lomaka I.A. [et al.] // Aerospace Science and Technology, 132:108038, 2023.
5. R. Storn, K. Price. Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces // J. Of Global Optim. 11, 1997. 341-359.