

## СИСТЕМА УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ МУЛЬТИРОТОРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В КВАТЕРНИОННОЙ ФОРМЕ

*Широкое распространение мультироторных беспилотных летательных аппаратов ставит все новые задачи перед разработчиками таких систем. На текущий момент одним из приоритетных направлений исследований являются методы увеличения робастности и безопасности полетов, рассматриваются всевозможные варианты отказов винтомоторных групп и, как следствие, возникает необходимость в обеспечении работоспособности систем угловой стабилизации в таких условиях.*

### ВВЕДЕНИЕ

Мультироторные летательные аппараты являются неустойчивыми объектами управления и поэтому требуют наличия сложной системы стабилизации в своем составе. Для управления угловой ориентацией таких летательных аппаратов, как правило, принято использовать углы Эйлера: крен ( $\phi$ ), тангаж ( $\theta$ ) и рыскание ( $\psi$ ). Однако представление угловой ориентации в таком виде имеет существенный недостаток, связанный с невозможностью поворота вокруг оси, независимо от совершенного вращения по другим осям (так называемое складывание рамок).

### I. ПРИМЕНЕНИЕ КВАТЕРНИОНОВ

Применение кватернионов в контуре угловой стабилизации решает данную проблему. Стоит также отметить, что большинство алгоритмов построения курсовертикалей имеют на выходе кватернионную форму представления угловой ориентации, поэтому целесообразно использовать непосредственно кватернионы в контуре управления угловым положением вместо дополнительного пересчета в углы Эйлера.

На рисунке 1 представлен контур угловой стабилизации мультироторного летательного аппарата в кватернионной форме.

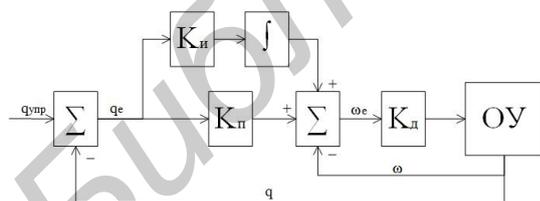


Рис. 1 – Контур угловой стабилизации мультироторного летательного аппарата

В основе контура угловой стабилизации лежит контур демпфирования угловой скорости  $\omega$  и ПИ-регулятор, который позволяет не только обеспечить отработку системой заданного угло-

вого положения, но и вносит астатизм, что убирает необходимость в точной центровке летательного аппарата.

### II. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА

Для получения ошибки по угловому положению летательного аппарата по каждой из осей вращения необходим расчет вектора ошибки  $q_e$  между заданным кватернионом  $q_{yup}$  и измеренным кватернионом  $q$ :

$$q_e = q_{yup} \otimes q^*$$

где  $q^*$  – сопряженный кватернион угловой ориентации вертолета.

Результатом векторного произведения является кватернион ошибки  $q_e$ , в векторной части которого содержатся значения ошибок по каждой из осей вращения ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ), которые используются в контуре угловой стабилизации. В случаях, когда заданное значение угловой ориентации  $q_{yup}$  в сумме на  $\pi$  и более радиан превышает текущее значение  $q$ , в качестве наикратчайшего пути поворота используется сопряженный кватернион  $q_e^*$ .

### III. ВЫВОДЫ

Применение кватернионов в контуре угловой стабилизации позволяет обеспечить отработку летательным аппаратом любых заданных углов по наикратчайшей траектории, минуя при этом необходимость учета складывания рамок, возникающего при использовании углов Эйлера.

1. D. Hoag Considerations of Apollo IMU Gimbal Lock – MIT, 1963. - 39 p.
2. J. B. Kuipers Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality – Princeton University Press, 2002. – 400 p.
3. J. Diebel Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors – Stanford University, 2006. – 35 p.

*Борсуков Александр Олегович, магистрант кафедры систем управления БГУИР, alxborsukov@gmail.com.*

*Научный руководитель: Хаджинов Михаил Касьянович, кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления БГУИР, m\_kh@tut.by.*