

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КВАДРОКОПТЕРА С  
ЖЕСТКО ЗАКРЕПЛЕННЫМ ГРУЗОМ МЕТОДОМ  
НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

*Закальская Ксения Вячеславовна*

*Студент*

*Факультет ВМК МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

*E-mail: s02240423@gse.cs.msu.ru*

*Научный руководитель — Гончаров Олег Игоревич*

Задача идентификации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа возникает при необходимости получения точной математической модели аппарата для применения в управлении, моделировании, а также для адаптации к нагрузке в онлайн режиме [1], [2].

В общем виде математическая модель динамики БПЛА в связанной системе аппарата может быть описана следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m(\dot{v}_O + \dot{\omega} \times \mathbf{r}_c + \omega \times (\omega \times \mathbf{r}_c)) = \sum_i r_{f_i} f_i + mR^{-1}g + \mathbf{F}_p, \\ I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) + \mathbf{r}_c \times (m(\dot{v}_O + \dot{\omega} \times \mathbf{r}_c + \omega \times (\omega \times \mathbf{r}_c))) = \\ \qquad \qquad \qquad = \sum_i (r_{p_i} \times r_{f_i}) f_i + \sum_i r_{\tau_i} K_{\tau_i} f_i + \boldsymbol{\tau}_p, \\ f_i = K_{f_{i0}} + K_{f_{i1}} \omega_{m,i} + K_{f_{i2}} \omega_{m,i}^2, \quad i = 1, \dots, N, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $R$  — матрица поворота из связанной в земную систему координат,  $r_c$  — положение центра масс,  $\mathbf{F}_p$ ,  $\boldsymbol{\tau}_p$  — внешние сила и момент,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\omega$  — угловая скорость,  $\dot{v}_O$  — линейное ускорение,  $\omega_{m,i}$  — угловые скорости винтов. Параметры  $K_{\tau_i}$  и  $K_{f_i}$  — коэффициенты момента и силы тяги соответственно. Инерциальные параметры ( $m$  — масса,  $I$  — матрица инерции), помимо массы самого ЛА, могут учитывать жестко закрепленный груз.

Рассматривать задачу идентификации можно в различных постановках: как оценку параметров винтов ( $K_{\tau_i}$ ,  $K_{f_i}$ ), определение полной модели БПЛА ( $K_{\tau_i}$ ,  $K_{f_i}$ ,  $m$ ,  $I$ ) или же отдельно нагрузки ( $m$ ,  $I$ ). Способ оценки параметров, представленный в работе, основан на методах наименьших квадратов (МНК) и наименьших полных квадратов (МНПК), широко используемых в литературе по данной тематике [3], [4]. Отличительной особенностью последнего метода яв-

ляется возможность учета неточности значений в матрице регрессоров.

Подход, описываемый в работе, заключается в том, чтобы за счет выбора эксперимента максимально исключить влияние инерциальных составляющих, а также параметров центра масс на матрицы регрессоров, тем самым получая наиболее точные оценки для параметров  $K_{f_i}$  — коэффициентов тяги. Далее с помощью отдельного эксперимента проводится идентификация  $K_{\tau_i}$  — коэффициентов момента. Следующим этапом является оценка инерциальных параметров  $(m, I)$  с учетом данных, полученных на первом и втором шаге, а также изначальных знаний о системе (предварительных оценок массы и инерции аппарата без груза). В качестве входных данных берутся показания акселерометра ( $\dot{v}_O$ ), гироскопа ( $\omega$ ), а также скорости вращения двигателей ( $\omega_{m,i}$ ), полученные во время полета.

При выполнении задачи эксперименты проводятся как на модельных данных в среде Gazebo, так и на физическом оборудовании. Для передачи управления на летательный аппарат, а также записи показаний датчиков использовались средства ROS2 (MAVROS), что позволило добиться максимальной согласованности и применимости единого программного кода в экспериментах как в симуляции, так и в реальности.

### Литература

1. Böhm C., Brommer C., Hardt-Stremayr A., Weiss S. Combined System Identification and State Estimation for a Quadrotor UAV // 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Xi'an, China, 2021, P. 585-591.
2. Iz S.A., Unel M. Vision-Based System Identification of a Quadrotor // 8th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), Dalian, China, 2023, P. 584-590.
3. Eschmann J., Albani D., Loiano G. Data-Driven System Identification of Quadrotors Subject to Motor Delays // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, P. 8095-8102.
4. Six D., Briot S., Erskine J., Chriette A. Identification of the Propeller Coefficients and Dynamic Parameters of a Hovering Quadrotor from Flight Data // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020, P. 1063-1070.