

the specifics of control of solar sail spacecraft (SC), which takes into account the translational and rotational motion of the whole structure. To control the motion of the SC, it is necessary to change the dimensions, properties, or orientation of the sail relative to the rays of the Sun. For heliocentric flight to planets, asteroids or the Sun in a first approximation we can consider only central photogravitational field of the Sun and additional driving force of light pressure of his rays on the sail. The equations of motion taking into account the perturbations can be presented in different forms based on models of the problem of two or three bodies while using convenient coordinate systems and main parameters.

УДК 681.5

### **Идентификация динамики движения квадрокоптера**

*Ю. Н. Золотухин<sup>1</sup>, К. Ю. Котов<sup>1</sup>, А. М. Свитова<sup>1,2</sup>, М. А. Соболев<sup>1</sup>*

*ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия<sup>1</sup>*

*НГУ, Новосибирск, Россия<sup>2</sup>*

*miraina@yandex.ru (Свитова А.М.)*

В работе рассматривается проблема идентификации динамической модели квадрокоптера, представленной рекуррентной нейронной сетью Элмана. Показана сходимость алгоритма настройки сети с помощью расширенного фильтра Калмана при использовании входных тестовых сигналов гармонического вида.

**Ключевые слова:** Идентификация динамики, квадрокоптер, расширенный фильтр Калмана, рекуррентная нейронная сеть Элмана

#### **1. Введение**

Использование классических алгоритмов управления техническими системами требует полного и точного описания исследуемого объекта. К таким системам относятся мультироторные летательные аппараты, которые в последнее время активно применяются для задач с высокоточным управлением. Однако из-за наличия неопределенности, подобные системы должны обладать свойством адаптивности, которое традиционные методы математического моделирования обеспечить не могут. Данная проблема может быть решена с помощью рекуррентных нейронных сетей, которые способны аппроксимировать произвольную динамическую систему, в том числе и нелинейную [1].

В данной работе предложен метод идентификации динамики вращения мультироторной системы типа квадрокоптер на основе рекур-

рентной нейронной сети Элмана. Для эффективного обучения нейронной сети используется фильтр Калмана.

## 2. Описание объекта управления

Полная математическая модель квадрокоптера приведена в [2], динамика вращательного движения представлена системой уравнений (1).

Положение квадрокоптера в пространстве характеризуется координатами  $x, y, z$  центра масс аппарата в неподвижной декартовой системе координат и тремя углами поворота -  $\phi, \theta, \psi$  (крен, тангаж и рысканье соответственно).

$$(1) \quad \begin{cases} I_{xx} \cdot \ddot{\phi} = u_2 - (I_{zz} - I_{yy}) \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\psi}; \\ I_{yy} \cdot \ddot{\theta} = u_3 - (I_{xx} - I_{zz}) \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\psi}; \\ I_{zz} \cdot \ddot{\psi} = u_4. \end{cases}$$

Здесь:  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  — моменты инерции относительно соответствующих осей квадрокоптера,  $u_2, u_3, u_4$  — управляющие воздействия. Точкой над переменными обозначаются производные величин по времени.

## 3. Метод идентификации

В качестве нейронной сети выступает рекуррентная сеть Элмана, архитектура которой определяется представленной моделью динамики вращательного движения (1).

Для обучения нейронной сети используется расширенный фильтр Калмана, который оценивает вектор состояния динамической системы  $(\mathbf{y}, \mathbf{W})^T$ , где  $\mathbf{y}$  - выходной сигнал нейронной сети,  $\mathbf{W}$  - матрица весов. Динамика системы определяется уравнениями:

$$\begin{cases} \mathbf{y}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{y}(k), \mathbf{W}(k), \mathbf{u}(k)); \\ \mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k). \end{cases}$$

Здесь  $\mathbf{f}$  представляет собой общую нелинейность, связывающую входной и выходной слой сети,  $\mathbf{u}(k)$  — вектор управляющих воздействий,  $k$  — временной шаг. Подробно этапы экстраполяции и коррекции приведены в [2].

## 4. Результаты моделирования

Для численного моделирования на вход нейронной сети были поданы три управляющих сигнала гармонического вида. На графике 1 показана сходимости весов, соответствующих операции интегрирования

в рекуррентной записи уравнений (1). На графике 2 зеленым показан входной управляющий сигнал, красным - выходной сигнал объекта управления, синей пунктирной кривой - оцененное значение угловой скорости по рысканью.

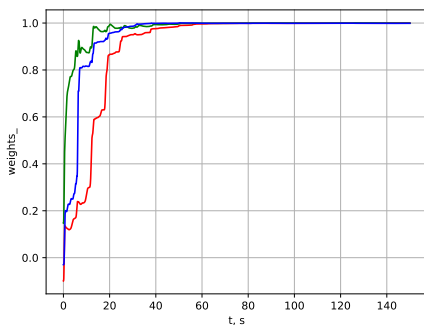


Рис. 1: График сходимости весов

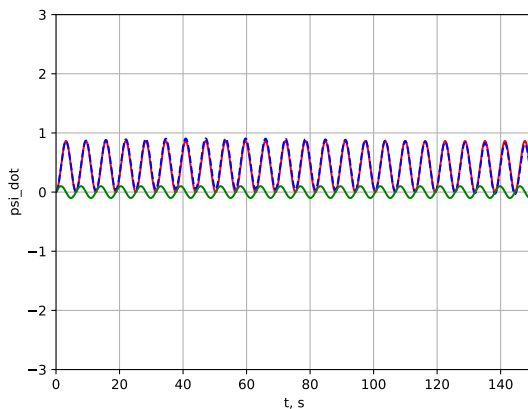


Рис. 2: Результаты численного моделирования

## 5. Заключение

В работе представлено описание динамической модели квадрокоптера с помощью рекуррентной нейронной сети Элмана с использованием фильтра Калмана для её настройки. Приведены результаты численного моделирования, показавшие эффективность использования нейронных сетей для идентификации динамической системы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-08-03233

### Список литературы

1. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. Издательский дом Вильямс, 2008.
2. *Белоконь С.А., Золотухин Ю.Н., Котов К.Ю., Мальцев А.С., Нестеров А.А., Пивкин В.Я., Соболев М.А., Филиппов М.Н., Ян А.П.* // Автометрия. 2013. Т. 49. № 6. С. 14–24

### Identification of quadcopter dynamics

*Yu. N. Zolotukhin<sup>1</sup>, K. Yu. Kotov<sup>1</sup>, A. M. Svitova<sup>1,2</sup>, M. A. Sobolev<sup>1</sup>*

*Institute of Automation and Electrometry, Novosibirsk, Russia<sup>1</sup>*

*Novosibirsk State University, Russia<sup>2</sup>*

*miraina@yandex.ru (A.M. Svitova)*

This paper describes the identification of quadcopter dynamics using Elman's recurrent neural network. The Kalman filter was used to configure this network. The results of the network operation were presented using harmonic input signals.