

А. Ассад<sup>1</sup>, С.А. Сериков<sup>2</sup>

**РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ «SOFTWARE-IN-THE-LOOP» ДЛЯ  
ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА,  
НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ  
ОРИЕНТАЦИИ (БПЛА)**



<sup>1</sup>Ассад Аммар

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Россия, Санкт-Петербург

Тел.: (906) 712-7237, E-mail: ammar.assad225@gmail.com



<sup>2</sup>Сериков Сергей Анатольевич

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Россия, Санкт-Петербург

Тел.: (911) 901-5478, E-mail: srkv@inbox.ru.

**Аннотация**

В данном исследовании была разработана и реализована платформа типа Software in the Loop (SITL) в среде Matlab Simulink для проверки валидации алгоритмов оценки ориентации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В качестве средства визуализации использовалось программное обеспечение FlightGear. В качестве модели объекта управления был применён квадрокоптер. SITL используется для валидации алгоритма повышения точности оценки ориентации БПЛА с применением метода роя частиц (Particle Swarm Optimization) и фильтра Калмана. Такое сочетание компонентов приближает условия тестирования к реальным. Итоговая платформа позволяет проводить валидацию и других алгоритмов, основанных на методах искусственного интеллекта, применяемых в задачах оценки ориентации БПЛА.

*Ключевые слова:* Software In The Loop, беспилотные летательные аппараты, FlightGear, оценка ориентации, искусственный интеллект.

## **Введение**

Разработка и тестирование алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в области применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальной задачей, поскольку испытания в реальном времени могут быть дорогостоящими и потенциально опасными для устройства при недостаточной надёжности алгоритма. Тестирование проводится с использованием моделирования, что позволяет получить определённую степень достоверности результатов, однако временные характеристики таких испытаний не соответствуют реальному времени. В связи с этим применяется другой тип тестирования — Software in the Loop (SITL). Для реализации данного вида испытаний необходимы: математическая модель БПЛА, программный код валидации алгоритма ИИ и средство визуализации в рамках единой среды моделирования. В данном случае средой моделирования является Matlab Simulink, а в качестве средства визуализации используется программное обеспечение FlightGear [1][2].

Авторы в [3] рассмотрели различные аспекты боевой эффективности авиации, подчеркнув ключевую роль завоевания превосходства в воздухе в условиях современных вооружённых конфликтов. Исследования сосредоточены на совершенствовании научных методов анализа и повышения эффективности боевого применения авиации с использованием инструментов моделирования и имитации. Особое внимание в работах уделено моделированию одиночных и групповых воздушных боёв, расчёту кинематических траекторий, принятию решений пилотами в сложных условиях боя, а также влиянию лётно-технических характеристик самолётов на успех выполнения боевых задач. Анализ более 100 источников позволил выявить общие подходы к построению моделей воздушных сражений, оценке боевой эффективности и применению современных технологий, включая методы искусственного интеллекта, для поддержки принятия тактических решений. При этом особый интерес представляют разработки, приближённые к реальным боевым условиям, с учётом координации действий нескольких летательных аппаратов. Новизна современных исследований заключается в формировании единых принципов моделирования и научных подходов к изучению воздушных боёв, что способствует дальнейшему развитию перспективных технологий и боевых стратегий. Полученные результаты могут быть полезны как инженерам и конструкторам авиационной техники, так и военным специалистам, занимающимся разработкой методов ведения воздушных боёв будущего

## **Методы**

Тестируемый алгоритм использует метод роя частиц (Particle Swarm Optimization) для повышения точности оценки ориентации БПЛА. Полная

реализация данного метода представлена в [4]. Реализация была выполнена на основе данных, полученных из экспериментов в реальном времени, однако тестирование проводилось только в среде моделирования. Алгоритм тестировался в связке с математической моделью БПЛА. Входными данными для тестируемого алгоритма в симуляции являются измерения с гироскопов ( $\Gamma_a$ ), акселерометров ( $A_a$ ) и магнитометров ( $M_a$ ), которые были получены из реальных экспериментов, а также эталонные параметры ориентации, представленные в виде углов Эйлера: крен (Roll), тангаж (Pitch) и рыскание (Yaw), обозначаемые как ( $K, T, P$ ).

Входными параметрами математической модели являются углы Эйлера, полученные из реальных экспериментов ( $K_c, T_c, P_c$ ) (или же эти параметры могут быть сгенерированы [6]) и используемые в качестве задаваемых значений. Управление математической моделью осуществляется с помощью ПИД-регулятора, который контролирует только высоту полёта БПЛА. Регулятор формирует четыре управляющих сигнала для квадрокоптера, которые поступают на вход математической модели. Выходными параметрами модели являются углы ориентации ( $K_a, T_a, P_a$ ) и координаты ( $X, Y, Z$ ; где  $Z$  — это высота).

Из углов ориентации ( $K_a, T_a, P_a$ ) вычисляются значения гироскопов, обозначаемые как ( $\Gamma_c$ ). Из координат ( $X, Y, Z$ ) рассчитываются значения акселерометров, обозначаемые как ( $A_c$ ). Измерения магнитометров формируются на основе параметров мирового магнитного поля в текущей позиции БПЛА с добавлением шума и обозначаются как ( $M_c$ ). Таким образом, входными данными тестируемого алгоритма в SITL являются ( $\Gamma_c, A_c, M_c$ ). Выходными данными алгоритма являются параметры ориентации ( $K_o, T_o, P_o$ ), которые затем сравниваются с ( $K_a, T_a, P_a$ ) и ( $K_c, T_c, P_c$ ). Полная блок-схема этой платформы показана на следующем рисунке

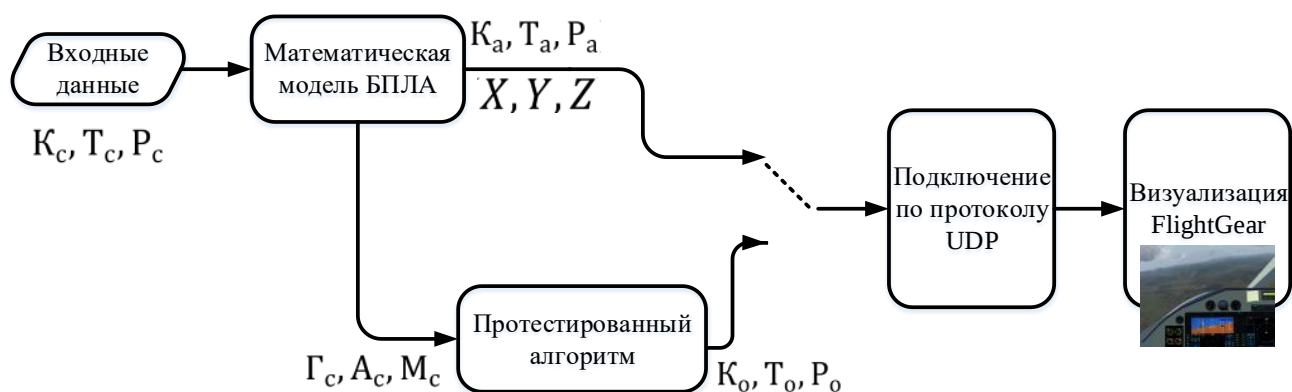
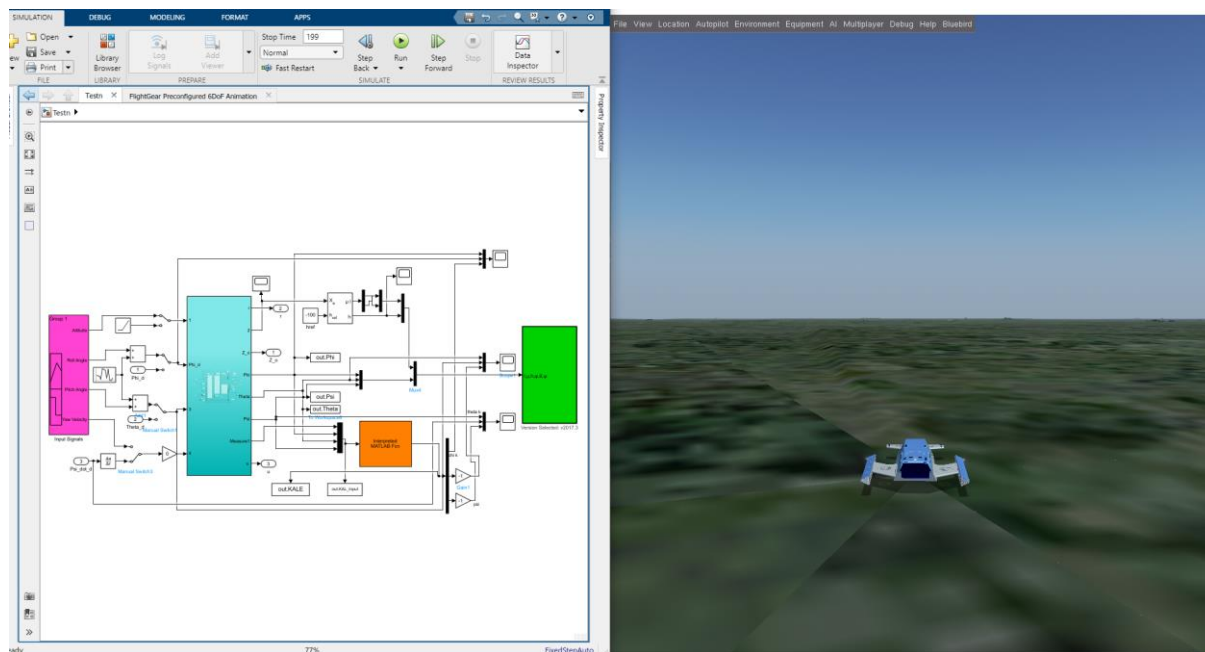


Рис. 1: Полная блок-схема платформы

## Результаты

Полная платформа с программным обеспечением Flightgear представлена ниже: Блок FlightGear выделен зелёным цветом, входные данные пурпурным цветом, тестируемый алгоритм — оранжевым цветом, а математическая модель БПЛА — голубым цветом.



**Рис. 2:** Полная платформа

Разработанная математическая модель и ПИД-регулятор были подробно описаны в [5]. Валидация модели осуществлялась путём задания требуемой высоты полёта, а также желаемых углов крена и тангажа, при этом заданный угол рыскания равнялся нулю. Также были протестированы различные сценарии работы системы. Помимо этого, на данной платформе проводилось тестирование данных, полученных из реальных экспериментов. На следующих рисунках представлены все результаты. Также приведены данные гироскопов и акселерометров.

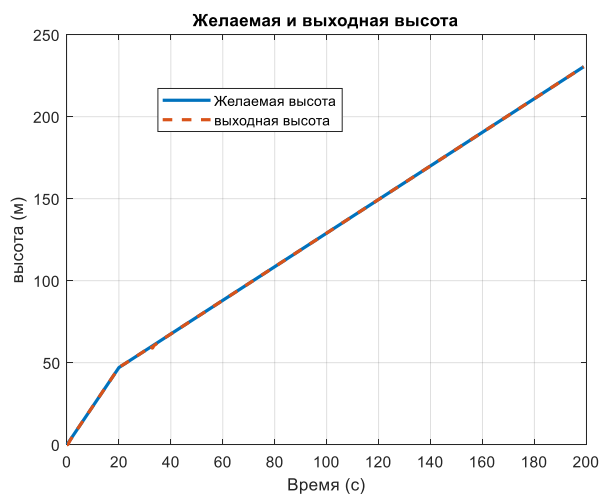


Рис. 3: Желаемая и выходная высота

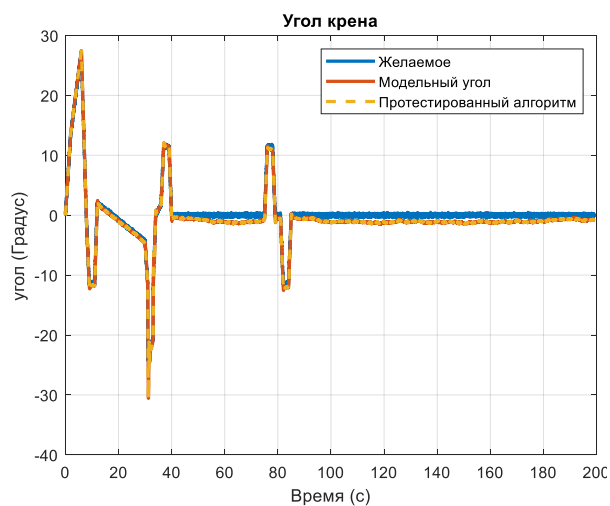


Рис. 4: Угол крена

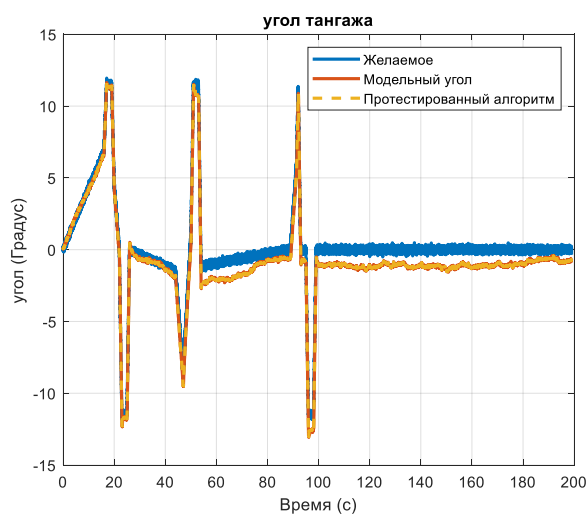


Рис. 5: Угол тангажа

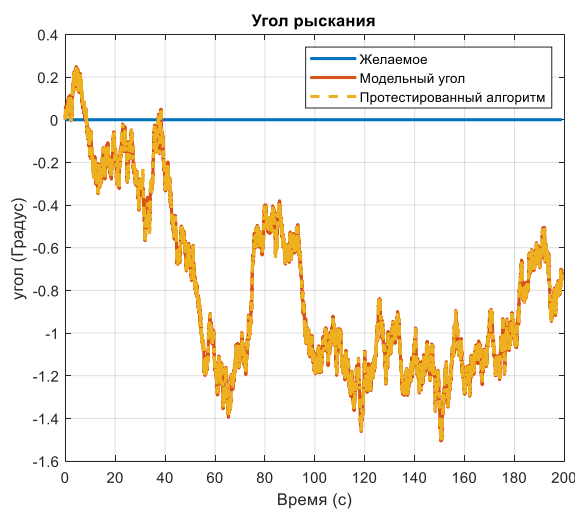


Рис. 6: Угол рыскания

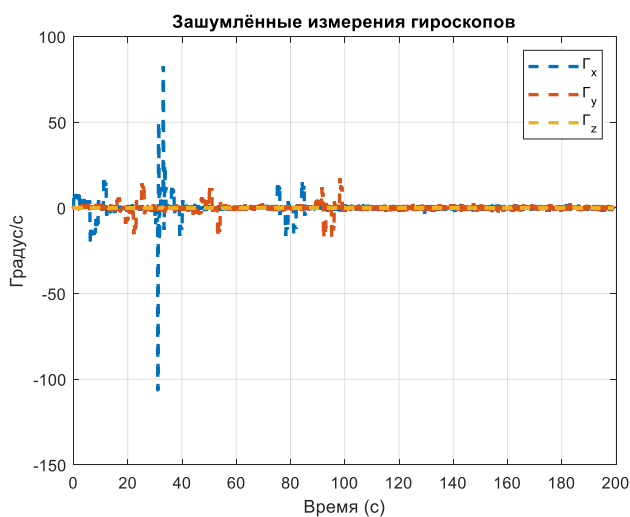


Рис. 7: Зашумленные измерения гироскопов

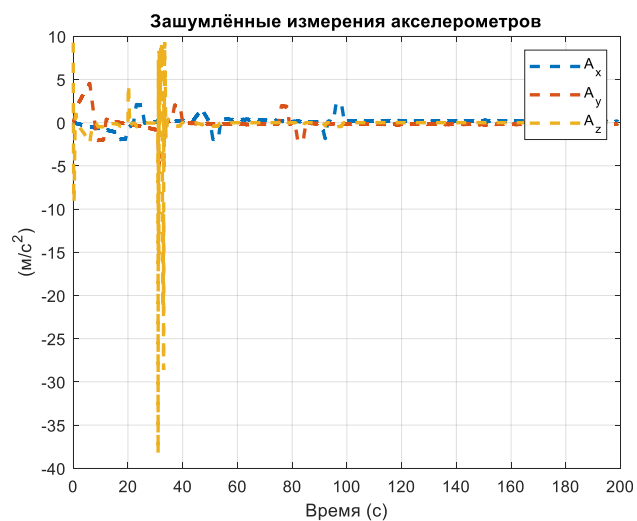
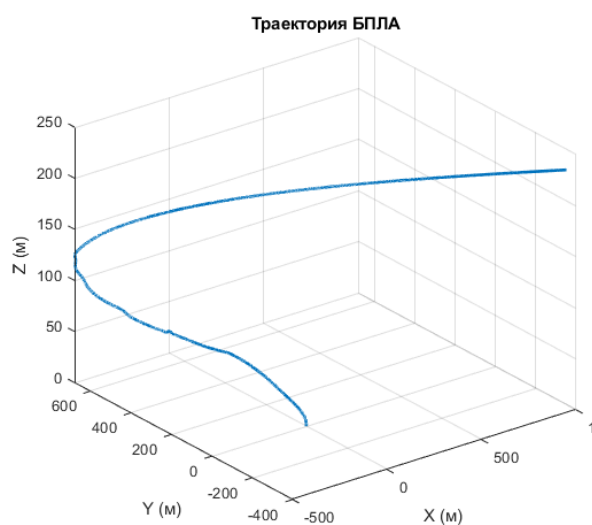


Рис. 8: Зашумленные измерения акселерометров

Трёхмерная траектория, показанная ниже



**Рис. 9:** Траектория БПЛА

### Обсуждение

Разработанная платформа *Software in the Loop* (SITL) продемонстрировала высокую эффективность для тестирования алгоритмов оценки ориентации с применением различных методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности метода оптимизации роя частиц (*Particle Swarm Optimization*) в рамках данного исследования. Основным преимуществом разработанной платформы является возможность приближения условий моделирования к реальным за счёт использования данных с датчиков, содержащих шум, а также интеграции модели в реальном времени в замкнутый контур. Это позволяет выявить устойчивость и точность алгоритмов, которые показывают высокие результаты в традиционных условиях численного моделирования, но требуют дополнительной валидации в условиях, приближённых к реальной эксплуатации.

Полученные результаты подтвердили надёжность сравнения эталонных или задаваемых параметров ориентации с выходными данными тестируемого алгоритма, что обеспечивает объективную оценку его точности и устойчивости. Таким образом, разработанная SITL-платформа может быть использована в качестве универсального инструмента для тестирования и сравнительного анализа различных алгоритмов оценки ориентации на основе методов искусственного интеллекта, включая нейронные сети, методы оптимизации и гибридные подходы. Платформа обеспечивает условия, максимально приближённые к реальным лётным испытаниям, при этом снижая риск повреждения оборудования и сокращая затраты на проведение экспериментов с реальными БПЛА.

Длительность тестируемого сценария составила 200 секунд. Алгоритм оценивания ориентации был протестирован отдельно, без использования данной платформы, и время выполнения теста составило около 2 минут, тогда как при использовании разработанной платформы продолжительность тестирования составила ровно 200 секунд.

## **Заключение**

В заключение следует отметить, что разработанная платформа может быть использована для тестирования различных подходов на основе искусственного интеллекта, применяемых для оценки параметров ориентации. Кроме того, она может быть адаптирована для решения широкого спектра задач, связанных с применением БПЛА.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Богославский Н. В. и др. Использование MATLAB для валидации и верификации встраиваемого программного обеспечения //ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. – 2019. – С. 50-64.
- [2] Каримова Д., Хашимова Ч. С., Джураева Ш. Т. Имитационное моделирование объектов технических систем //Science and innovation. – 2023. – Т. 2. – №. Special Issue 3. – С. 685-690.
- [3] Макаренко С. И., Афонин И. Е. Моделирование боевых действий авиации и оценки их эффективности–анализ работ, моделей, актуальных направлений исследований //Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – №. 3. – С. 78-125.
- [4] Assad A., Serikov S. Improvement the Accuracy of Attitude Estimation of UAV using the Extended Kalman Filter based on Particle Swarm Optimization //International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – Т. 13. – №. 3. – С. 15-24.
- [5] Ferry N. Quadcopter plant model and control system development with matlab/simulink implementation //Kate Gleason College of Engineering Rochester Institute of Technology Rochester, New York. – 2017.
- [6] Ассад А., Сериков С. А. Моделирование датчиков беспилотного летательного аппарата для формирования набора данных имитационных экспериментов для оценки алгоритмов определения ориентации. – 2024.

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE-IN-THE-LOOP PLATFORM FOR TESTING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS TO IMPROVE UAV ORIENTATION ESTIMATION

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

### Abstract

In this research, a Software in the loop (SITL) platform was developed and implemented in Matlab Simulink environment to test the validation of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Orientation estimation. Flightgear software was used as visualization tool. Quadcopter Plant Model was used as UAV. SITL is used for the validation of algorithm of increasing the accuracy of UAV orientation estimation using Particle swarm optimization method and Kalman filter. This connection of components makes the test closer to the real one. The final platform is able to validate other algorithms of using artificial intelligence algorithms in the field of UAV orientation estimation.

*Key words:* Software in The Loop, Unmanned Aerial Vehicles, FlightGear, Orientation Estimation, Artificial Intelligence.

### REFERENCES

- [1] Bogoslovsky N. V. and others. Using MATLAB for the validation and verification of embedded software //TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT AND DEBUGGING OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS. – 2019. – pp. 50-64 (rus).
- [2] Karimova D., Hashimova Ch.S., Dzhuraeva Sh.T. Simulation modeling of objects of technical systems //Science and innovation. – 2023. – Vol. 2. – no. Special Issue 3. – pp. 685-690 (rus).
- [3] Makarenko S. I., Afonin I. E. Modeling of aviation combat operations and evaluating their effectiveness–analysis of works, models, and current research directions //Management, communication and security systems. – 2024. – No. 3. – pp. 78-125 (rus).
- [4] Assad A., Serikov S. Improvement the Accuracy of Attitude Estimation of UAV using the Extended Kalman Filter based on Particle Swarm Optimization //International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – T. 13. – №. 3. – C. 15-24.
- [5] Ferry N. Quadcopter plant model and control system development with matlab/simulink implementation //Kate Gleason College of Engineering Rochester Institute of Technology Rochester, New York. – 2017.
- [6] Assad A., Serikov S. A. Modeling sensors of an unmanned aerial vehicle to generate a data set of simulation experiments to evaluate algorithms for determining orientation. – 2024 (rus).