

Научная статья

УДК 004.94

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185120>

EDN: <https://www.elibrary.ru/RHAGRU>

## **РАЗРАБОТКА СИМУЛЯТОРА УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРОМ С GPS-ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ**

**Александр Сергеевич Макаров<sup>1✉</sup>, Владислав Александрович Чеканин<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,  
Москва, Россия

<sup>1</sup>[MakarovAlex2002@yandex.ru](mailto:MakarovAlex2002@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>[vladchekanin@yandex.ru](mailto:vladchekanin@yandex.ru)

**Аннотация.** Рынок беспилотных летательных аппаратов расширяется с каждым годом, требуя привлечения все большего количества кадров в качестве операторов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в том числе, операторов квадрокоптеров. Наряду с этим растет популярность квадрокоптеров у авиамоделистов и видеографов-любителей. Подготовка квалифицированных операторов БПЛА представляет собой важную задачу для обеспечения безопасности в воздушном пространстве. В статье рассматриваются подходы к тренировке операторов квадрокоптеров и приводится аргументация в пользу применения виртуальных симуляторов в подготовке. Симуляторы позволяют пользователям приобретать начальные навыки пилотирования без риска повреждения имущества

или нанесения кому-либо вреда. В ходе работы выполнен анализ существующих симуляторов, включающий описание их функциональные возможностей, преимуществ и недостатков. Приведены сведения о разработанном прототипе симулятора, в котором присутствует возможность интеграции проприетарных пультов управления квадрокоптеров с GPS-позиционированием, отсутствие (или ограниченность) поддержки которых является существенным недостатком существующих симуляторов GPS-квадрокоптеров. В прототипе поддержан пульт DJI RC-N1, являющийся одним из наиболее распространенных на момент конца 2024 года. Помимо базового функционала, в разработанном прототипе присутствуют обучающие сценарии, в которых пользователь может получить навыки управления беспилотником при возникновении различных внештатных и критических ситуаций. Применение такого симулятора в процессе обучения будет способствовать повышению качества подготовки операторов, снижению аварийности и уменьшению финансовых рисков, связанных с человеческим фактором. Представленное решение может быть полезно как для любителей, так и для будущих коммерческих операторов. В последующем проект будет развиваться за счет экстенсивного расширения базы поддерживаемых пультов, создания новых тренировочных сценариев и добавления большего количества моделей квадрокоптеров, учитывающих их физические характеристики и особенности управления.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, обучение операторов квадрокоптеров, симулятор

*Для цитирования:* Макаров А.С., Чеканин В.А Разработка симулятора управления квадрокоптером с GPS-позиционированием // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185120>

Original article

## **DEVELOPMENT OF A QUADCOPTER CONTROL SIMULATOR WITH GPS POSITIONING**

**Alexander S. Makarov<sup>1✉</sup>, Vladislav A. Chekanin<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Moscow State University of Technology «STANKIN»,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

<sup>1</sup>[MakarovAlex2002@yandex.ru](mailto:MakarovAlex2002@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>[vladchekanin@yandex.ru](mailto:vladchekanin@yandex.ru)

**Abstract.** The unmanned aerial vehicle (UAV) market is expanding every year, requiring the involvement of an increasing number of personnel as UAV operators, including quadcopter operators. Alongside this, the popularity of quadcopters is growing among aviation model enthusiasts and amateur videographers. The training of qualified UAV operators is a crucial task for ensuring airspace safety. This article examines approaches to training quadcopter operators and presents arguments in favor of using virtual simulators in the training process. Simulators allow users to acquire initial piloting skills without the risk of damaging property or causing harm to others. As part of this study, an analysis of existing simulators was conducted, including a description of their functional capabilities,

advantages, and disadvantages. Information is provided about a developed simulator prototype that includes the possibility of integrating proprietary quadcopter controllers with GPS positioning, the lack (or limitation) of support for which is a significant drawback in existing GPS quadcopter simulators. The prototype supports the DJI RC-N1 controller, one of the most widely used as of late 2024. In addition to basic functionality, the developed prototype features training scenarios in which users can acquire UAV control skills under various emergency and critical situations. The use of such a simulator in training will contribute to improving operator preparation quality, reducing accidents, and minimizing financial risks associated with human error. The presented solution can be useful for both hobbyists and future commercial operators. In the future, the project will be developed by extensively expanding the database of supported controllers, creating new training scenarios, and adding more quadcopter models that take into account their physical characteristics and control features.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, quadcopter, quadcopter operator training, simulator

**For citation:** Makarov A.S., Chekanin V.A. Development of a quadcopter control simulator with GPS positioning. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185120>

## **Введение**

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), ставшие доступными на массовом рынке в 2000-х годах, быстро обрели широкую популярность и нашли применение во многих прикладных сферах, начиная с задач автоматизации сельского хозяйства, инспектированием объектов инфраструктуры и заканчивая задачами в области кинематографа и управления световыми шоу [1]. В целом за

2023 год в России было продано БПЛА на общую стоимость 33.7 млрд руб., о чем свидетельствует исследование некоммерческой организации «АЭРОНЕКСТ». Мировой рынок беспилотных летательных аппаратов на конец 2023 года оценивается более чем в 2.8 триллиона рублей и большинство экспертов убеждено в том, что он продолжит расти (рис. 1). Особое место среди общего разнообразия БПЛА занимают квадрокоптеры – четырехроторные беспилотники, являющиеся на данный момент времени самыми распространенными мультикоптерами.



Рисунок 1 – Мировой объем рынка БПЛА и прогнозы до 2030 года

Для сборки квадрокоптеров, применяемых в корпоративном и аграрном сегменте, а также продвинутых квадрокоптеров любительского уровня применяют передовые технологии и сложную микроэлектронику, что делает их дорогостоящими устройствами. Нельзя не упомянуть и тот факт, что часто они переносят ценное оборудование, необходимое как для осуществления различных работ (камеры с

многоосевыми стабилизаторами для фото- и видео-съемки в высоком разрешении; тепловые камеры; системы сброса), так и для перевозки различных грузов [2].

В качестве примера можно привести профессиональный квадрокоптер для видеосъемки DJI Inspire 3, оснащенный 8k камерой, рекомендованная цена которого составляет более 1.5 млн руб. в минимальной комплектации. Вышеперечисленное заставляет задуматься об обеспечении безопасного пилотирования и создания превентивных мер для недопущения аварий с участием квадрокоптеров, которые влекут за собой критичные поломки дорогостоящего оборудования. Следует также отметить, что авария квадрокоптера с более крупным воздушным судном (самолетом, вертолетом) способна привести к трагическим последствиям. Кроме того, квадрокоптер, столкнувшийся даже на малой скорости с живым существом или предметом, способен нанести серьезный вред, так как приводится в движение пропеллерами, вращающимися на высокой скорости.

Для предотвращения аварий производители квадрокоптеров используют различные программные и аппаратные средства, которыми могут ограничиваться зоны возможных полетов (например, делается недоступным взлет и перемещение вблизи территорий аэропортов и военных баз), внедряются ультразвуковые и фотоэлектрические датчики, предупреждающие оператора об опасной близости с окружающими объектами, внедряются системы автоматического обхода препятствий, системы автоматического возврата на точку «дома» при потере сигнала пульта. Однако все эти технологии не могут в полной мере гарантировать безопасность полетов. При этом за любые несчастные случаи всегда ответственен тот, кто осуществляет управление квадрокоптером или пишет для него полетную

программу, т.е. оператор. В случае квадрокоптеров с радиоуправлением именно от навыков оператора, его скорости реакции и умения принимать быстрые и правильные решения зависит безопасность воздушного судна, которым он управляет, а также окружающих его живых и неживых объектов [3, 13]. По этой причине крайне важна предварительная подготовка операторов квадрокоптеров [14].

### **Методы подготовки операторов квадрокоптеров**

Самым простым вариантом для подготовки операторов квадрокоптеров являются тренировки с реальными устройствами на больших открытых пространствах [20]. Такие тренировки исключают возможность случайного причинения вреда окружающим, однако не могут гарантировать безопасность для самих квадрокоптеров, которые, как было упомянуто выше, представляют собой дорогостоящие технологичные устройства. Для жителей мегаполисов может оказаться затруднительным (или невозможным) поиск пустого безлюдного места для тренировок вблизи от дома, а плохие погодные условия и ограниченное количество батарей не будут способствовать долгим и частым тренировкам начинающих операторов.

Решением данных проблем является применение виртуальных симуляторов в обучающем процессе, где для тренировок необходим только персональный компьютер и пульт управления (или игровой контроллер) [4]. Виртуальный симулятор управления квадрокоптером предоставляет пользователю возможность тренироваться в любое время, а также избавляет от трат на ремонт и амортизацию беспилотной техники [16, 17]. В виртуальном симуляторе пользователь может

ознакомиться с основами управления квадрокоптером, выучить назначение стиков и кнопок пульта управления, узнать о возможных факторах риска при управлении беспилотником [21]. Недостатком виртуального симулятора можно назвать аппроксимацию физических моделей и неточную передачу поведения настоящего квадрокоптера, так что заменить реальные тренировки в полной мере он не может, однако оператор, прошедший предварительную подготовку в виртуальном симуляторе, будет чувствовать себя увереннее и сможет лучше контролировать ситуацию при управлении настоящим квадрокоптером [5], поскольку уже не будет путать элементы управления, и с большей вероятностью сможет принять правильное решение в критической ситуации.

### **Существующие симуляторы квадрокоптеров**

На данный момент на рынке представлено множество симуляторов квадрокоптеров, однако большинство из них относится к симуляторам квадрокоптеров с «АТТІ» управлением, то есть способных удерживать высоту полета, но не имеющих возможность автоматического удержания заданной позиции в двухмерной плоскости, либо квадрокоптеров с управлением «ACRO», у которых отсутствует какая-либо стабилизация [22]. Механизм управления в таких симуляторах для пользователя будет отличаться от механизма управления квадрокоптерами, обладающими GPS-позиционированием и возможностью поддержания положения в пространстве, что сделает процесс обучения управлением GPS-квадрокоптерами менее адекватным.

Рассмотрим более подробно квадрокоптеры с GPS-позиционированием. Помимо упомянутой возможности удержания положения в пространстве относительно трех осей [6], эти БПЛА часто обладают автономными функциями, добавленными производителем, такими как следование за объектом, облет точки интереса, самостоятельный возврат на точку взлета и т.д. Большая часть таких квадрокоптеров поставляется в виде готовых решений, а самыми распространенными являются модели производства DJI – китайской компании, которой по разным оценкам принадлежит от 54 до 76% рынка гражданских БПЛА (пример оценки за 2021 год представлен на рис. 2, данные взяты из исследования немецкой компании Drone Industry Insights, произведенного в марте 2021). Следует отметить, что зачастую компании используют проприетарные аппаратные модули, программное обеспечение и протоколы взаимодействия в «готовых» беспилотниках с GPS позиционированием, и DJI не является исключением.

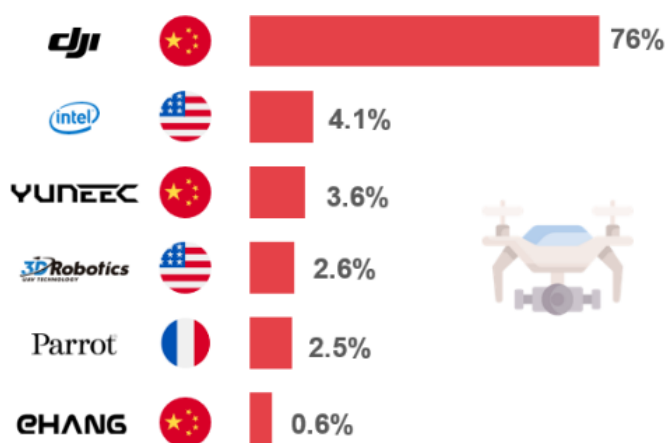


Рисунок 2 – Оценка рынка потребительских и коммерческих БПЛА по объёмам продаж в 2021 году

Симуляторов квадрокоптеров с GPS позиционированием значительно меньше, чем симуляторов «АТТИ» и «АCRO» квадрокоптеров. Сравнительный анализ трех актуальных симуляторов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение симуляторов квадрокоптеров с GPS-позиционированием

| Критерий                       | Zephyr Drone Simulator   | DJI Flight Simulator                                        | SimuDrone                                                           |
|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Год выхода                     | 2016                     | 2018                                                        | 2022                                                                |
| Цена                           | 15 - 80\$                | 1500\$ (есть бесплатная версия с ограниченным функционалом) | 7\$ (есть бесплатная версия с ограниченным функционалом и временем) |
| Критерий                       | Zephyr Drone Simulator   | DJI Flight Simulator                                        | SimuDrone                                                           |
| Реалистичная графика           | Да                       | Да                                                          | Нет                                                                 |
| Реалистичная физическая модель | Да                       | Да                                                          | Нет                                                                 |
| Количество карт                | 5                        | 6                                                           | 4                                                                   |
| Обучающий режим                | Да                       | В полной версии                                             | Нет                                                                 |
| Поддерживаемые платформы       | Windows, MacOS           | Windows                                                     | Android, iOS                                                        |
| Поддерживаемые контроллеры     | Xbox, стандартные пульты | Xbox, некоторые контроллеры DJI, вышедшие до 2019 года      | DJI RC-N1                                                           |
| 3D движок                      | Unity                    | Unreal Engine 4                                             | Unity                                                               |

Как видно из таблицы 1, ни один из рассмотренных симуляторов не поддерживает большого числа проприетарных пультов управления GPS-квадрокоптерами, а большинство прочих симуляторов в своей библиотеке вовсе не имеет поддержки таких пультов (это справедливо также для Zephyr Drone Simulator). DJI Flight Simulator является хорошим примером того, каким должен быть обучающий симулятор, однако его поддержка завершилась в 2019 году, и на текущий момент графика в нем выглядит устаревшей (рис. 3), а новые пульты, такие

как, например, DJI RC-N1, RC-N2, RC-N3, используемые для квадрокоптеров серий Mavic, Mavic mini, Mavic air и Neo, уже не поддерживаются. Симулятор SimuDrone, разработанный для мобильных устройств, не характеризуется большим функционалом и поддерживает всего один пульт управления (а также сенсорный ввод).

Произведенный анализ показывает, что создание симулятора управления GPS-квадрокоптером с поддержкой проприетарных пультов и режимом обучения приведет к появлению уникального продукта, который будет востребован среди начинающих операторов квадрокоптеров, что подтверждается периодически возникающими обсуждениями в сообществе владельцев квадрокоптеров DJI форума Reddit (рис. 4).

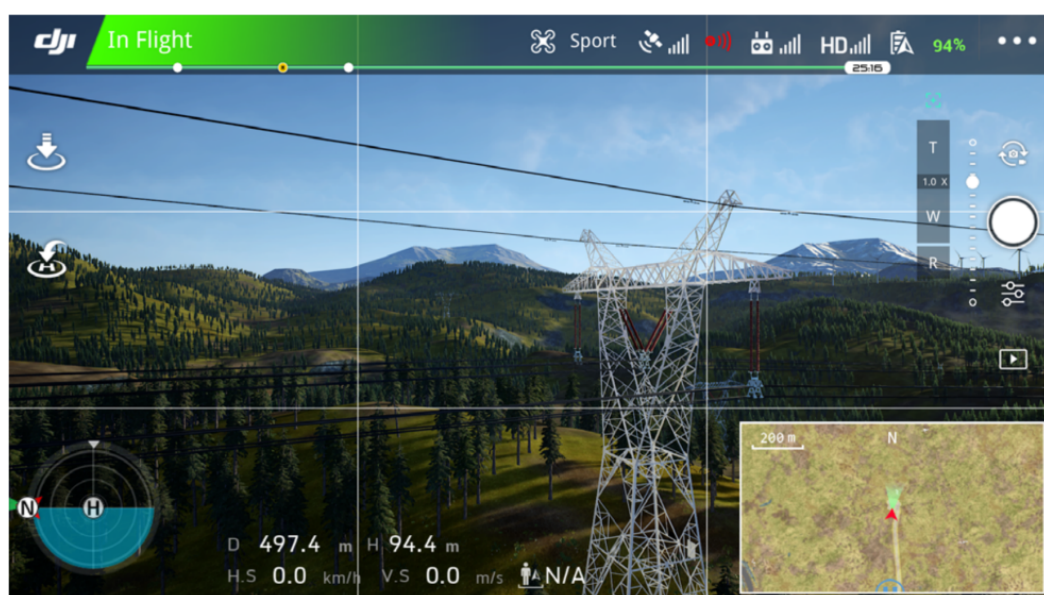


Рисунок 3 – Графика в DJI Flight Simulator

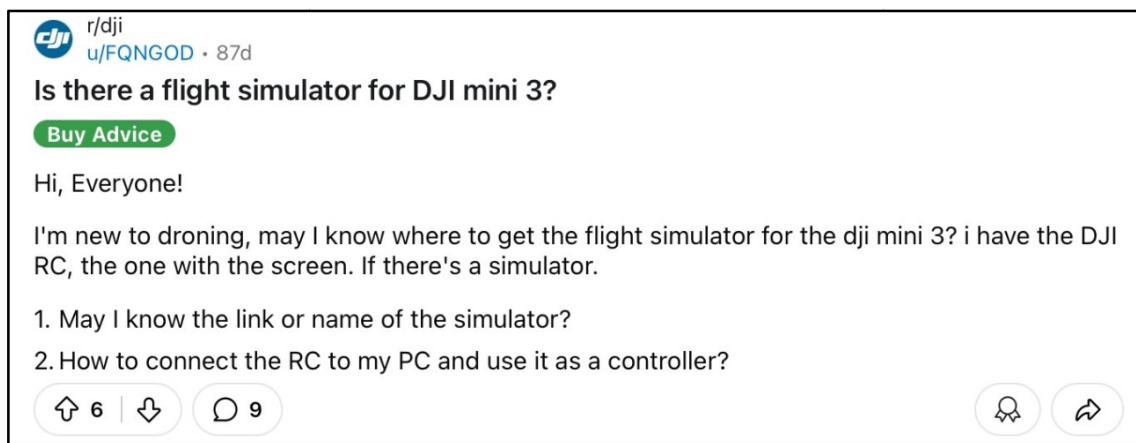


Рисунок 4 – Доказательство интереса к виртуальным симуляторам

### Разработка прототипа симулятора

Для разработки прототипа симулятора был применен игровой движок Unreal Engine версии 5.3, интегрированная среда разработки Visual Studio Community 2022 и программное обеспечение для 3D-моделирования Blender. Часть проекта реализована при помощи системы визуального программирования Blueprint, облегчающей процесс разработки и поддержки решения; другая часть для оптимизации скорости вычислений реализована на языке C++.

Состав и взаимодействие компонентов, входящих в состав разработанного программного решения, представлены на рисунке 5. Также на этом рисунке можно увидеть обобщенные блоки методов, отвечающие за формирование интерфейса пользователя, функционирование обучающей системы, взаимодействие с пультом дистанционного управления, подключенного к компьютеру пользователя и др. [23].

Стабилизация квадрокоптера реализована при помощи PID-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального) (рис. 5), который подбирает параметры прилагаемой силы, позволяющей квадрокоптеру поддерживать статичное положение в воздухе. PID-регуляторы широко применяются в различных

сферах для автоматического управления процессами, где требуется достижение и поддержание заданных параметров [24].

PID-регуляторы также используются и в управлении реальными квадрокоптерами, другими воздушными судами [7].

Ниже изложен принцип работы PID-регулятора:

- пропорциональная составляющая (P) – в зависимости от отклонения от заданного положения, оказывает пропорциональное воздействие для его достижения;
- интегральная составляющая (I) – призвана бороться с накопленными ошибками;
- дифференциальная составляющая (D) – повышает устойчивость системы, предсказывая будущее состояние системы и оказывая на него влияние на основе расчета скорости изменения ошибки.

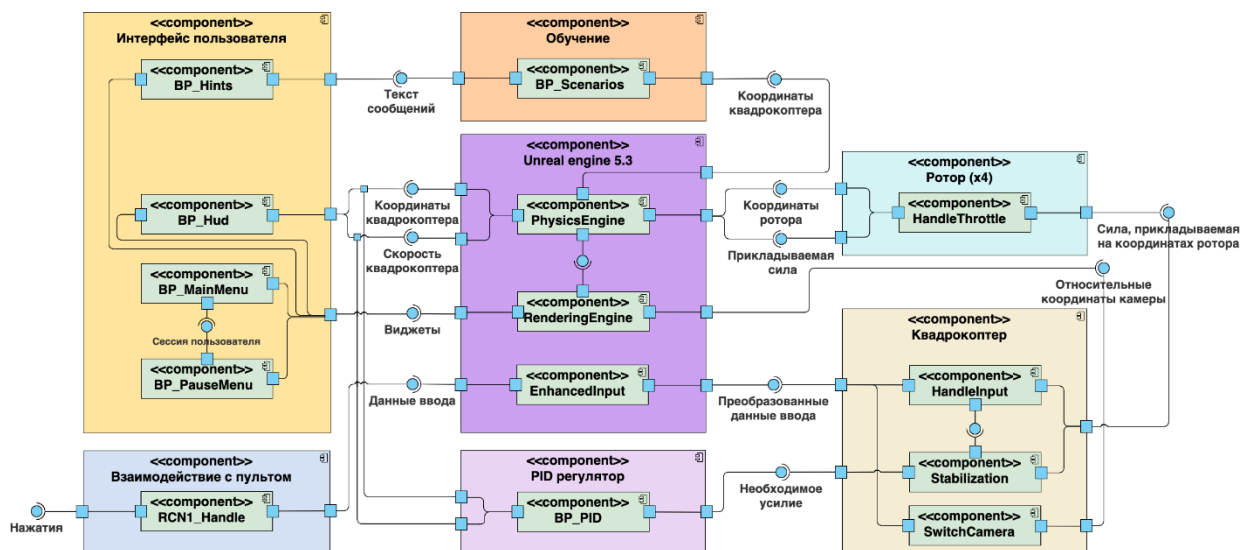


Рисунок 5 – UML диаграмма взаимодействия компонентов системы

PID-регуляторы достаточно просты и универсальны, но при правильном

подборе коэффициентов способны справляться с задачами управления с высокой точностью.

Схема работы PID-регулятора представлена на рисунке 6. Здесь  $r(t)$  – целевое значение показателя системы;  $e(t)$  – текущая ошибка;  $u(t)$  – воздействие, оказываемое на процесс "Plant /Process" для достижения целевого значения (при этом  $e(t) = r(t) - y(t)$ , где  $y(t)$  – текущий выходной показатель).

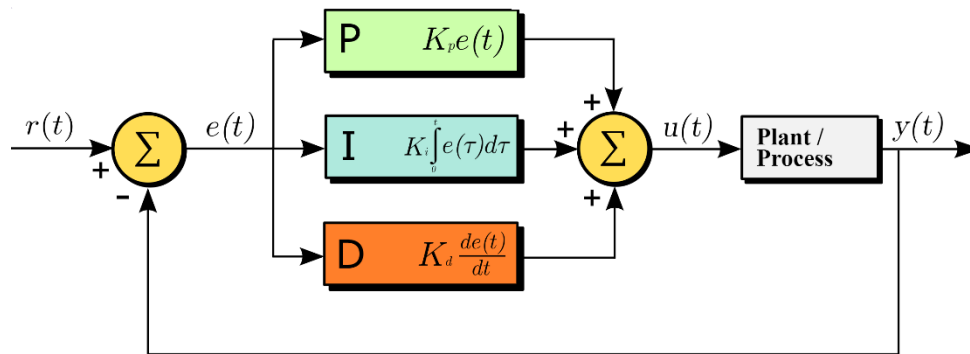


Рисунок 6 – Общая схема работы PID регулятора

Как было упомянуто выше, пульты квадрокоптеров с GPS-позиционированием зачастую не используют стандартные протоколы обмена информацией [8], поэтому необходимо отдельное исследование и разработка для каждой популярной модели пульта. Был разработан C++ модуль для получения данных от пульта DJI RC-N1 (также известного как DJI RC231) (рис. 7).



В процессе исследования было обнаружено, что пакеты DUML по своей структуре соответствует протоколу MAVLink v0.9 (рис. 8), который является открытым стандартом, применяемым для организации связи с беспилотными летательными аппаратами [26]. Однако DJI использует собственный набор команд и таблицы для вычисления контрольных сумм.

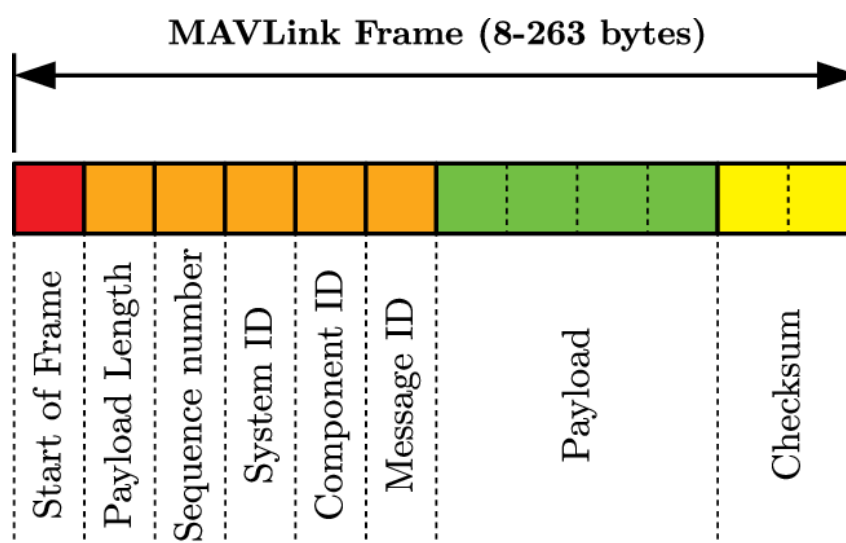


Рисунок 8 – Протокол MAVLink

В целом, интеграция других пультов DJI является выполнимой задачей, поскольку процесс формирования пакетов DUML в последние годы не претерпевал существенных изменений между поколениями пультов, а получаемые от них сведения могут быть нетрудно интерпретированы путем отслеживания изменений в составе байтов ответа пульта при выполнении различных операций с ним.

Другой важной особенностью разработанного прототипа симулятора стали обучающие сценарии (рис. 9 и 10). Они помогут узнать о рекомендуемых действиях, которые необходимо выполнять в различных потенциально опасных ситуациях, а

также представят пользователю возможность самостоятельно с ними справиться. Осведомленность о факторах риска позволит заранее распознавать их признаки и заблаговременно предпринимать действия для обеспечения безопасности воздушного судна. Рассмотрим примеры некоторых сценариев, которые могут быть добавлены в симулятор и будут полезны для обучения операторов квадрокоптеров.

1. Потеря спутниковой связи – с данной ситуацией нередко сталкиваются владельцы квадрокоптеров (особенно в мегаполисах). Большинство квадрокоптеров, оснащенных ультразвуковыми и фотоэлектрическими датчиками, при потере спутниковой связи на низкой высоте переходят в режим управления «OPTI», в котором они все еще способны поддерживать статичное положение в пространстве, опираясь на данные, получаемые от нижних датчиков (что не так эффективно, но в целом не отличается от обычного управления). В ином случае управление существенно осложняется, переключаясь в режим «ATTI» или «ACRO».
2. Потеря связи с пультом управления – если такая ситуация уже произошла, то сделать что-либо в большинстве случаев уже невозможно. Но важно научиться ее предотвращать – нельзя продолжать автономный полет, если радиосигнал значительно ухудшается. Необходимо держать пульт направленным в сторону квадрокоптера для лучшего сигнала. Перед началом полета важно откалибровать компас беспилотника и включить возврат на точку взлета на выбранной высоте, чтобы квадрокоптер автоматически вернулся обратно при потере связи с пультом, если он обладает данной функцией. Однако в случае, если возврат на точку взлета может привести к аварии (взлет под кронами

- деревьев, взлет с движущейся лодки), автоматический возврат стоит отключить и производить полет в этом случае следует предельно осторожно.
3. Сильный ветер – стоит избегать полетов в излишне ветреную погоду [27]. Однако если квадрокоптер уже попал в сильные воздушные потоки, необходимо включить спортивный режим (при его наличии), снизить высоту и как можно быстрее осуществить посадку.
  4. Полет над водой – при кажущейся простоте, полеты над водными преградами могут быть опасны при выборе слишком больших или малых высот. На большой высоте могут быть сильные порывы ветра, тогда как на малой у многих моделей беспилотников плохо работают нижние датчики, сообщая неправильную информацию о высоте. Ошибки вызваны алгоритмами их работы, плохо справляющимися с однообразными и зеркальными поверхностями. Наконец, при полете над водой особое внимание нужно уделять заряду батареи, так как при нехватке заряда квадрокоптер может не успеть долететь до берега.
  5. Нападение птиц – такие случаи нередки [9]. Птицы бывают агрессивно настроены по отношению к беспилотникам, а их нападение может привести к остановке роторов или перевороту БПЛА в воздухе, результатом чего станет падение. Для избежания подобных ситуаций необходимо внимательно следить за происходящим вокруг беспилотника, а при приближении крупных птиц резко набрать высоту – ни одна птица не сможет сделать это с такой же скоростью, как беспилотник.

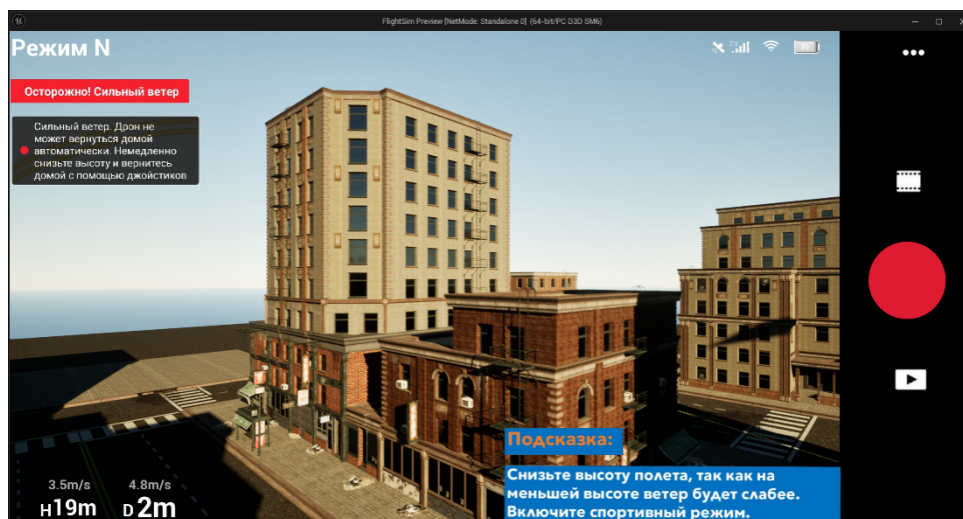


Рисунок 9 – Обучающий сценарий полета при сильном ветре

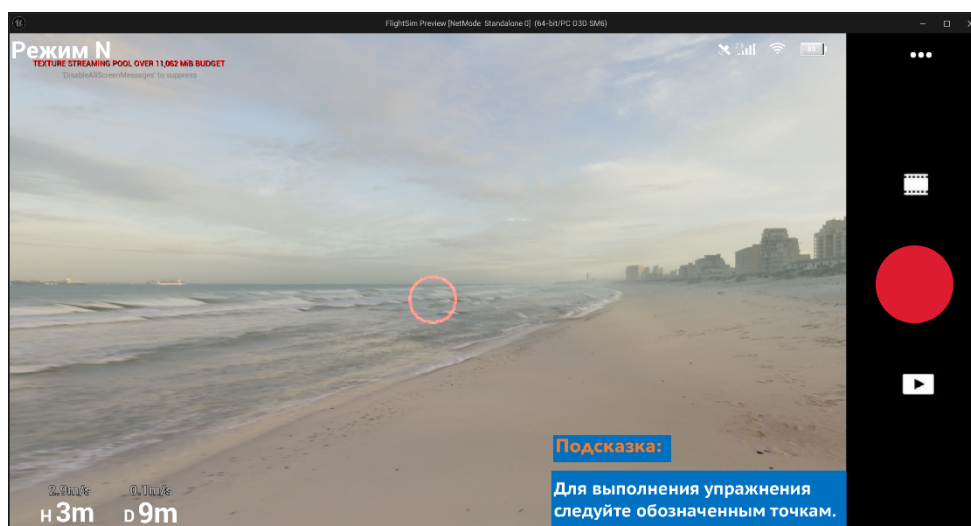


Рисунок 10 – Обучающий сценарий полета над водой

Разработанный симулятор обладает реалистичной физической моделью. Для имитации поведения реального квадрокоптера был задействован физический движок, входящий в состав Unreal Engine 5.3. Модель квадрокоптера имеет массу, соответствующую полетной массе, заявленной производителем, а силы прикладываются в местах расположения роторов, реализованных отдельными компонентами, что дает возможность в будущем добавлять в симулятор не только квадрокоптеры, а также, в частности, и гексакоптеры [10]. Для определения столкновения модели квадрокоптера с другими объектами, расположенными в

виртуальном пространстве, добавлены зоны коллизии (для которых при создании кадра будет проверяться пересечение с зонами коллизий других объектов) [11], реализованные с помощью геометрических примитивов для упрощения расчетов и оптимизации работы симулятора (рис. 11).

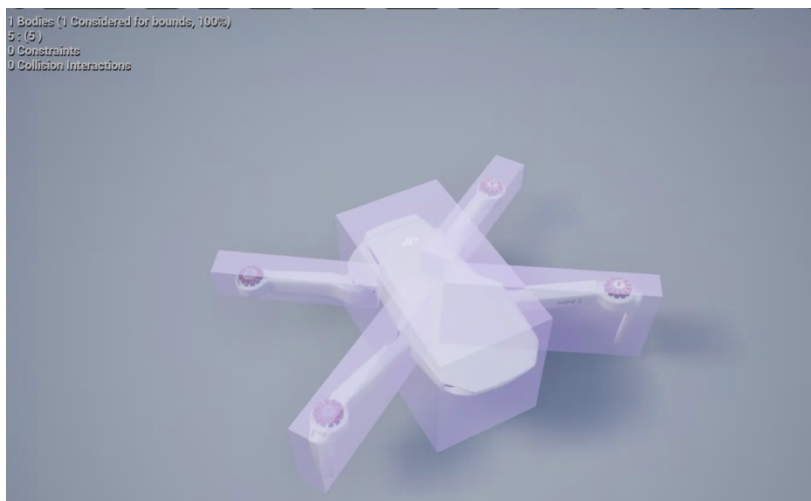


Рисунок 11 – Упрощенная модель коллизии квадрокоптера

В симуляторе добавлена поддержка управления с помощью клавиатуры и мыши, Xbox-совместимого контроллера и пульта DJI RC-N1. Добавлено несколько моделей квадрокоптеров на выбор, а также несколько карт и обучающих сценариев (рис. 12).

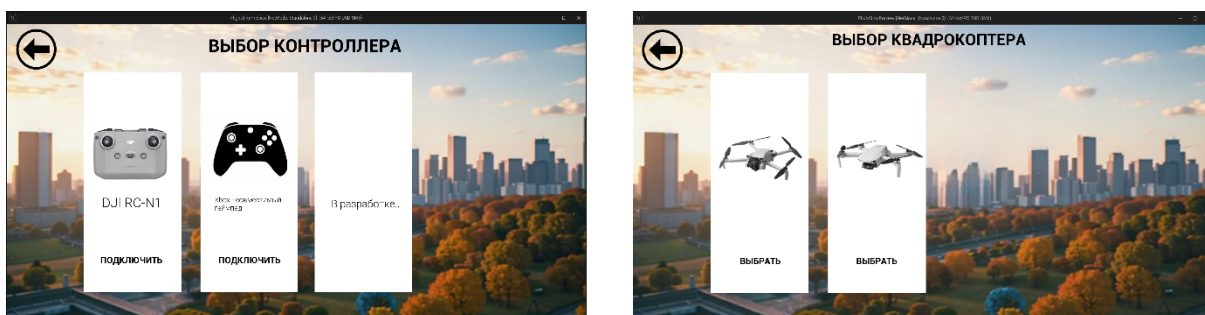


Рисунок 12 – Меню выбора контроллера и квадрокоптера

Сборка проекта была осуществлена для операционной системы Microsoft Windows. Замер производительности осуществлялся на ПК со следующей конфигурацией:

- процессор – Ryzen 5 5600g до 4.44 ГГц;
- оперативная память – 16 Гб DDR4 на частоте 3600 МГц (16-19-19-38);
- видеокарта – GTX 970 (power limit 40% - 100 Ватт) 4 Гб VRAM;
- накопитель SSD, скорость чтения / записи ~ 3300 Мбайт/с;
- операционная система Microsoft Windows 11 версия 23H2, x64.

Замер производительности проводился с помощью приложения MSI Afterburner + Riva Tuner. Разрешение рендеринга 2560×1440, настройки графики высокие, HUD отключен (рис. 13).

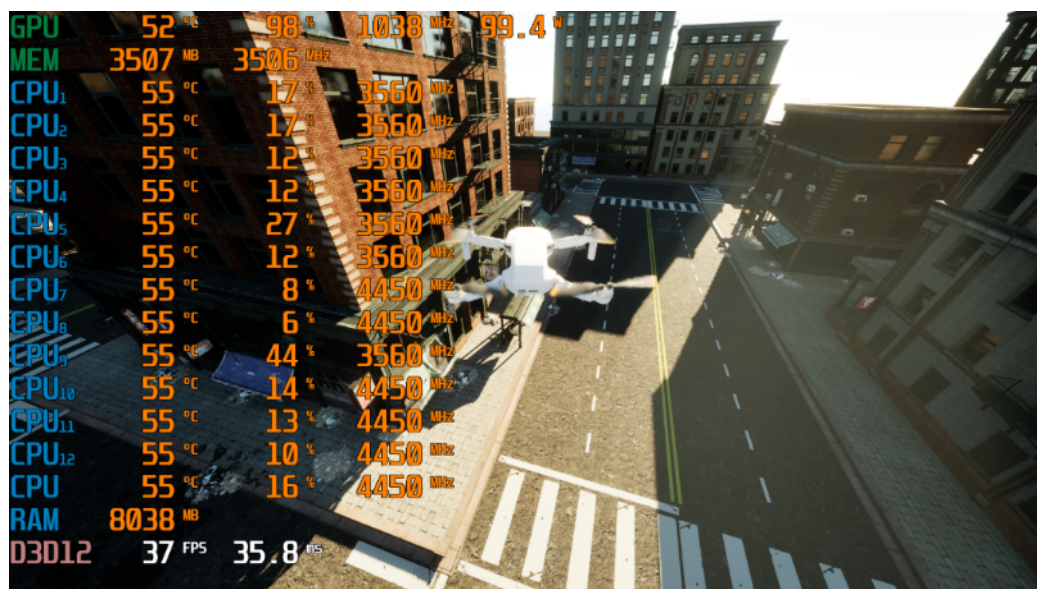


Рисунок 13 – Замер производительности разработанного решения

Произведем сравнение между разработанным прототипом и его основным конкурентом – DJI Flight Simulator. Как видно из сравнительной таблицы 2, на

данный момент прототип уже имеет преимущество над официальным симулятором DJI, а потенциал развития достаточно широк.

Готовый прототип может быть доработан путем добавления большего количества квадрокоптеров и карт [18]. Также можно существенно расширить его возможности, добавив поддержку считывания данных с пультов других моделей квадрокоптеров. Кроме того, могут быть добавлены новые обучающие сценарии и улучшена физическая модель. Разработанная архитектура симулятора реализует поддержку языка C++ для оптимизации высоконагруженных модулей и добавления новых возможностей, описание которых затруднительно при помощи Blueprint.

Таблица 2

### Сравнительный анализ разработанного прототипа и DJI Flight Simulator

| Критерий                       | Прототип                                                                                               | DJI Flight Simulator                                        |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Цена                           | Планируемая стоимость полной версии 5\$                                                                | 1500\$ (есть бесплатная версия с ограниченным функционалом) |
| Реалистичная графика           | Да, качество графики заметно лучше                                                                     | Да                                                          |
| Реалистичная физическая модель | Да                                                                                                     | Да                                                          |
| Количество карт                | 2, но будут добавляться новые. В перспективе можно добавить возможность создания пользовательских карт | 6                                                           |
| Критерий                       | Прототип                                                                                               | DJI Flight Simulator                                        |
| Обучающий режим                | Да                                                                                                     | В полной версии                                             |
| Поддерживаемые платформы       | Windows                                                                                                | Windows                                                     |
| Поддерживаемые контроллеры     | Xbox, современный DJI RC-N1, библиотека будет расширена в процессе разработки                          | Xbox, некоторые контроллеры DJI, вышедшие до 2019 года      |
| 3D движок                      | Современный Unreal Engine 5.3                                                                          | Unreal Engine 4                                             |
| Поддержка                      | Будет осуществляться доработка системы на основании отзывов пользователей                              | Прекращена в 2019                                           |

## **Выводы**

Управление квадрокоптерами требует от оператора высокого уровня подготовки. Виртуальные симуляторы могут обеспечить начальную подготовку оператора и имеют множество преимуществ по сравнению с другими способами тренировок [19]. Создание симулятора управления GPS квадрокоптером с поддержкой современных пультов является актуальной задачей.

В разработанном прототипе симулятора реализован как базовый функционал, типичный для данного вида программных решений, так и поддержка ввода с распространенного пульта DJI RC-N1, взаимодействие с которым присутствует лишь в единицах существующих решений. В дальнейшем библиотека поддерживаемых устройств ввода будет расширяться. Симулятор аппроксимировано повторяет физику реальных объектов и способствует улучшению навыков управления квадрокоптером, а также обучает возможным выходам из потенциально опасных ситуаций.

Внедрение компьютерного симулятора в процесс обучения позволяет сократить затраты на обучение новых операторов, а также обеспечивает безопасность процесса обучения [12, 15].

Симулятор также может способствовать повышению интереса и мотивации обучаемых, так как предоставляет возможность практиковаться в безопасной среде с возможностью мгновенного получения обратной связи о выполненных действиях.

## Список источников

1. Абрамов М.М. Новые и перспективные направления применения беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 227-232.
2. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90439>
3. Звоников В.М., Куликов С.А. Об особенностях профессионально важных качеств операторов беспилотных летательных аппаратов // Прикладная психология и педагогика. 2024. № 1. С. 36-43. DOI: [10.12737/2500-0543-2024-9-1-36-43](https://doi.org/10.12737/2500-0543-2024-9-1-36-43)
4. Василькин Д.П., Любский Д.И. Подходы к разработке образовательных виртуальных симуляторов // V Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и инновации» (Саратов, 12 апреля 2021): сборник статей. - Саратов: Изд-во Цифровая наука, 2021. С. 39-43.
5. Князев А.С. Особенности применения тренажёрных имитаторов многофункциональных индикаторов в процессе обучения личного состава // Труды МАИ. 2023. № 128. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=171412>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-23)
6. Корнилов В.А., Молодяков Д.С., Синявская Ю.А. Система управления мультикоптером // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35543>

7. Пантелеев А.В., Летова Т.А., Помазуева Е.А. Применение методов глобальной оптимизации для параметрического синтеза обобщенного пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в задаче управления полетом // Труды МАИ. 2015. № 79. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=55635>
8. Данилин З.А., Коваленко А.Н. Достоинства и недостатки протокола ELRS при использовании в беспилотных летательных аппаратах // Материалы XIII Республиканской научно-практической конференции «Обеспечение пограничной безопасности и охрана государственной границы республики Беларусь: теория и практика» (Минск, 28 февраля 2024). - Минск: Институт пограничной службы Республики Беларусь», 2024. С. 33.
9. Шевцов А.С., Ильях М.П. Изучение птиц с помощью квадрокоптера // Русский орнитологический журнал. 2020. № 1930. С. 2456-2470.
10. Гоголев А.А. Полунатурное моделирование беспилотных летательных аппаратов типа мультикоптер // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=77238>
11. Михайлюк М.В., Трушин А.М. Расчет коллизий параллелепипедов в задачах динамики // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. 2012. Т. 2, № 2. С. 51-58.
12. Матвеев С.Н., Галлямова Э.Х., Киселев Б.В. О статистической оценке внедрения обучающих математических тренажеров-симуляторов в обучение // Проблемы современного педагогического образования. 2021. № 71-1. С. 249-255.

13. Шалимов А.А. Эффективное обучение персонала для достижения оптимальной стратегии управления проектами // Вестник МГТУ "Станкин". 2009. № 4 (8). С. 122-125.
14. Михайлова М.В. Социальная ценность как основа профессионального развития личности в технологической среде // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 3 (46). С. 147-150.
15. Никулина Е.Н., Тарасова Е.В. Методика оценки эффективности модернизации испытательных подразделений предприятий по производству летательных аппаратов // Вестник МГТУ "Станкин". 2016. № 1 (36). С. 91-95.
16. Дудоров Е.А., Сохин И.Г., Курицын А.А. Имитационно-моделирующий стенд эргономического сопровождения робототехнических систем космического назначения // Вестник МГТУ "Станкин". 2021. № 1 (56). С. 64-75.
17. Иванова Н.А., Рябов С.А., Шварцбург Л.Э. Мультимедийные обучающие системы по обеспечению безопасности в производственной среде // Вестник МГТУ "Станкин". 2015. № 4 (35). С. 128-131.
18. Алиев Р.С. Математическая модель оценки сложности разработки программного обеспечения // Вестник МГТУ "Станкин". 2015. № 2 (33). С. 93-97.
19. Позднеев Б.М., Сутягин М.В., Селиванцев О.И. Моделирование структуры и оценка качества процессов электронного обучения // Вестник МГТУ "Станкин". 2012. № 1 (19). С. 60-65.
20. Nwaogu J.M. et al. Enhancing Drone Operator Competency within the Construction Industry: Assessing Training Needs and Roadmap for Skill Development // Buildings. 2024. V. 14, No. 4. P. 1153. DOI: [10.3390/buildings14041153](https://doi.org/10.3390/buildings14041153)

21. Somerville A. et al. Use of Simulation for Pre-Training of Drone Pilots // Drones. 2024. V. 8, No. 11. P. 640. DOI: [10.3390/drones8110640](https://doi.org/10.3390/drones8110640)
22. Usama A. et al. First Person View Drone-FPV // The International Undergraduate Research Conference. The Military Technical College. 2021. V. 5, No. 5. P. 437-440. DOI: [10.21608/iugrc.2021.246400](https://doi.org/10.21608/iugrc.2021.246400)
23. Mairaj A., Baba A.I., Javaid A.Y. Application specific drone simulators: Recent advances and challenges // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. V. 94, P. 100-117. DOI: [10.1016/j.simpat.2019.01.004](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.01.004)
24. Safir P. PID controller. Its types, working and applications // The Scientific Heritage. 2022. V. 102, P. 55-57. DOI: [10.5281/ZENODO.7409178](https://doi.org/10.5281/ZENODO.7409178)
25. Yoon Y.H., Yun J. Drone Flight Record Forensic System through DUMML Packet Analysis // Journal of the Korea Institute of Information Security & Cryptology. 2024. V. 34, No. 1. P. 103-114. DOI: [10.13089/jkiisc.2024.34.1.103](https://doi.org/10.13089/jkiisc.2024.34.1.103)
26. Koubâa A. et al. Micro air vehicle link (MAVlink) in a nutshell: A survey // IEEE Access. 2019. V. 7, P. 87658-87680. DOI: [10.1109/access.2019.2924410](https://doi.org/10.1109/access.2019.2924410)
27. Gao M. et al. Weather constraints on global drone flyability // Scientific reports. 2021. V. 11, No. 1. P. 12092. DOI: [10.1038/s41598-021-91325-w](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91325-w)

## References

1. Abramov M.M. New and Promising Directions for the Use of Unmanned Aerial Vehicles. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 3. P. 227-232. (In Russ.)

2. Ronzhin A.L., Nguen V.V., Solenaya O.Ya. Analysis of the problems of unmanned flying manipulators development and UAV physical interaction with ground objects. *Trudy MAI*. 2018. No. 98. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90439>
3. Zvonikov V.M., Kulikov S.A. On the Features of Professionally Important Qualities of UAV Operators. *Prikladnaya psikhologiya i pedagogika*. 2024. No. 1. P. 36-43. (In Russ.). DOI: [10.12737/2500-0543-2024-9-1-36-43](https://doi.org/10.12737/2500-0543-2024-9-1-36-43)
4. Vasil'kin D.P., Lyubskii D.I. Approaches to the Development of Educational Virtual Simulators. *V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nauchnye issledovaniya i innovatsii»*: sbornik statei. Saratov: Izd-vo Tsifrovaya nauka Publ., 2021. P. 39-43.
5. Knyazev A.S. Features of the use of simulators of multifunctional indicators in the process of personnel training. *Trudy MAI*. 2023. No. 128. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171412>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-23](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-23)
6. Kornilov V.A., Molodyakov D.S., Sinyavskaya Yu.A. Sistema upravleniya mul'tikopterom. *Trudy MAI*. 2012. No. 62. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35543>
7. Panteleev A.V., Letova T.A., Pomazueva E.A. An application of global optimization methods to the parametric synthesis of generalized proportional-integral-derivative controller for the flight control problems. *Trudy MAI*. 2015. No. 79. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=55635>

8. Danilin Z.A., Kovalenko A.N. Advantages and Disadvantages of the ELRS Protocol for Use in Unmanned Aerial Vehicles. *Materialy XIII Respublikanskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Obespechenie pograničnoi bezopasnosti i okhrana gosudarstvennoi granitsy respubliki Belarus': teoriya i praktika»*. Minsk: Institut pograničnoi sluzhby Respubliki Belarus' Publ., 2024. P. 33.
9. Shevtsov A.S., Il'yukh M.P. Studying Birds Using a Quadcopter. *Russkii ornitologicheskii zhurnal*. 2020. No. 1930. P. 2456-2470. (In Russ.)
10. Gogolev A.A. Semi-natural modelling of unmanned aerial vehicles like multicopter. *Trudy MAI*. 2017. No. 92. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77238>
11. Mikhailyuk M.V., Trushin A.M. Collision Calculation of Parallelepiped in Dynamics Problems. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta sistemnykh issledovaniy Rossiiskoi akademii nauk*. 2012. V. 2, No. 2. P. 51-58. (In Russ.)
12. Matveev S.N., Gallyamova E.KH., Kiselev B.V. On the Statistical Assessment of the Implementation of Educational Mathematical Simulators in Training. *Problemy sovremennogo pedagogicheskogo obrazovaniya*. 2021. No. 71-1. P. 249-255. (In Russ.)
13. Shalimov A.A. Effective Personnel Training for Achieving an Optimal Project Management Strategy. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2009. No. 4 (8). P. 122-125. (In Russ.)
14. Mikhailova M.V. Social Value as a Basis for Professional Development in a Technological Environment. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2018. No. 3 (46). P.147-150. (In Russ.)

15. Nikulina E.N., Tarasova E.V. Methodology for Assessing the Effectiveness of Modernization of Test Units in Aircraft Manufacturing Enterprises. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2016. No.1 (36). P. 91-95. (In Russ.)
16. Dudorov E.A., Sokhin I.G., Kuritsyn A.A. Simulation Stand for Ergonomic Support of Space Robotic Systems. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2021. No. 1 (56). P. 64-75. (In Russ.)
17. Ivanova N.A., Ryabov S.A., Shvartsburg L.E. Multimedia Training Systems for Ensuring Safety in the Industrial Environment. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2015. No. 4 (35). P. 128-131. (In Russ.)
18. Aliev R.S. Mathematical Model for Assessing the Complexity of Software Development. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2015. No. 2 (33). P. 93-97. (In Russ.)
19. Pozdneev B.M., Sutyagin M.V., Selivantsev O.I. Modeling the Structure and Quality Assessment of E-Learning Processes. *Vestnik MGTU "Stankin"*. 2012. No. 1 (19). P. 60-65. (In Russ.)
20. Nwaogu J.M. et al. Enhancing Drone Operator Competency within the Construction Industry: Assessing Training Needs and Roadmap for Skill Development. *Buildings*. 2024. V. 14, No. 4. P. 1153. DOI: [10.3390/buildings14041153](https://doi.org/10.3390/buildings14041153)
21. Somerville A. et al. Use of Simulation for Pre-Training of Drone Pilots. *Drones*. 2024. V. 8, No. 11. P. 640. DOI: [10.3390/drones8110640](https://doi.org/10.3390/drones8110640)
22. Usama A. et al. First Person View Drone-FPV. *The International Undergraduate Research Conference. The Military Technical College*. 2021. V. 5, No. 5. P. 437-440. DOI: [10.21608/iugrc.2021.246400](https://doi.org/10.21608/iugrc.2021.246400)

23. Mairaj A., Baba A.I., Javaid A.Y. Application specific drone simulators: Recent advances and challenges. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2019. V. 94, P. 100-117. DOI: [10.1016/j.simpat.2019.01.004](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.01.004)
24. Safir P. PID controller. Its types, working and applications. *The Scientific Heritage*. 2022. V. 102, P. 55-57. DOI: [10.5281/ZENODO.7409178](https://doi.org/10.5281/ZENODO.7409178)
25. Yoon Y.H., Yun J. Drone Flight Record Forensic System through DUMML Packet Analysis. *Journal of the Korea Institute of Information Security & Cryptology*. 2024. V. 34, No. 1. P. 103-114. DOI: [10.13089/jkiisc.2024.34.1.103](https://doi.org/10.13089/jkiisc.2024.34.1.103)
26. Koubâa A. et al. Micro air vehicle link (MAVlink) in a nutshell: A survey. *IEEE Access*. 2019. V. 7, P. 87658-87680. DOI: [10.1109/access.2019.2924410](https://doi.org/10.1109/access.2019.2924410)
27. Gao M. et al. Weather constraints on global drone flyability. *Scientific reports*. 2021. V. 11, No. 1. P. 12092. DOI: [10.1038/s41598-021-91325-w](https://doi.org/10.1038/s41598-021-91325-w)

Статья поступила в редакцию 06.01.2025

Одобрена после рецензирования 10.02.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 06.01.2025; approved after reviewing on 10.02.2025; accepted for publication on 25.06.2025