

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ СТРОЯ ОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ<sup>1</sup>

Девятковский Т.Е., Трефилов П.М.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
timdev04@gmail.com

*Аннотация. С годами растёт количество БПЛА в сфере доставки, малейшая поломка, связанная с двигателем может привести к падению, следовательно, утрате или повреждению груза. Доклад посвящен предполагаемому решению данной проблемы, путём стабилизации БПЛА, при неисправности одного двигателя.*

*Ключевые слова: БПЛА, груз, падение, стабилизация.*

### Введение

В течении нескольких лет, разные сферы деятельности начинают использовать БПЛА. Сегодня их активно внедряют в такие сферы как сельское хозяйство, строительство, обслуживание коммуникаций и других, например, 36% покупателей предпочитают доставку БПЛА нежели чем другими способами доставки [1], а количественное использование БПЛА возросло на 324% в период с 2018 по 2021 [2]. Во всех странах активно практикуется доставка при помощи БПЛА. Так, например, Россия, является одним из мировых лидеров в области доставки беспилотными летательными аппаратами [3], с 2013 года, компании активно разрабатывают и испытывают свои БПЛА для доставки различных грузов, посылок, еды и т.д. [4 – 6].

В интеллектуальной транспортной среде беспилотные летательные аппараты (БПЛА) мультироторного типа нашли широкое применение и стали важным элементом современных технологий. Их способность к автономному полету и маневренности делают их рациональным выбором для различных задач, связанных с транспортными системами.

Одной из основных областей применения БПЛА в интеллектуальной транспортной среде является мониторинг и обзор транспортных маршрутов. БПЛА могут осуществлять наблюдение за дорожным движением, контролировать состояние дорог и детектировать возможные аварийные ситуации. Они способны предоставить оперативную информацию о пробках, дорожных заторах, неисправностях на дорогах и других факторах, влияющих на безопасность и эффективность движения.

Кроме того, БПЛА могут применяться в системах поставки грузов и почты. Они могут доставлять товары и посылки на удаленные территории, в труднодоступные места или в условиях, где традиционные транспортные средства могут столкнуться с ограничениями. БПЛА способны снизить время доставки и улучшить эффективность логистических операций.

Кроме того, БПЛА также находят применение в обеспечении безопасности транспортной инфраструктуры. Они могут осуществлять наблюдение за периметрами, охранять железнодорожные линии, аэропорты и другие объекты. БПЛА обеспечивают непрерывное наблюдение и своевременное обнаружение возможных угроз, что помогает предотвратить преступную деятельность и обеспечить безопасность пассажиров и персонала.

Интеллектуальная транспортная среда также позволяет найти применение БПЛА для решения задач экологического мониторинга. Аппараты могут использоваться для контроля загрязнения воздуха, измерения уровня шума и мониторинга состояния экосистем. БПЛА предоставляют более широкий охват и точность данных, что помогает оценить экологические риски и принять меры по их устранению.

Появляясь в городах, БПЛА непосредственно влияют на жизнь людей, однако совершая полеты на улицах общего пользования, они создают опасность для обычных людей. В нештатной ситуации БПЛА может потерять контроль, что при падении может нанести вред окружающим, или принести прочие издержки эксплуатантам и потребителям. Так, например, в Швейцарской почтовой службе, после падения почтового БПЛА возле детей, решили отказаться от такого вида доставок [7].

Применение БПЛА в интеллектуальной транспортной среде предоставляет множество возможностей для улучшения безопасности, эффективности и устойчивости транспортных систем. БПЛА играют важную роль в мониторинге, доставке грузов, обеспечении безопасности и

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00338, <https://rscf.ru/project/23-19-00338/>

экологическом контроле. С их помощью можно создать более интеллектуальную и эффективную транспортную среду, способствующую прогрессу и развитию общества.

Тем не менее, основным ограничением в повсеместном использовании БПЛА все еще остаётся цена оборудования и риски потерять вложенные в него средства из-за малейшей неисправности. Так, одним из ключевых рисков является падение БПЛА во время полета при выходе из строя одного из двигателей.

## 1. Постановка задачи

Проблема с выходом из строя одного из двигателей БПЛА мультироторного типа наиболее сильно влияет на полёт. Отказ двигателя может произойти по многим причинам, в том числе могут повредиться и лопасти БПЛА. Климатические условия сильно влияют на двигатели [8], при сильном ветре, резком перепаде температур и других внешних воздействий может непосредственно привести к потере одного из моторов, следственно и к падению БПЛА.

Современные БПЛА мультироторного типа не может потерять сразу два и более двигателей, если эта проблема не касается полётного контроллера, проблем с сигналом и т.п. проблем. Чаще всего из строя выходит только 1 двигатель, чаще такое возникает в следствии большего воздействие на него. Из-за ветра, один из двигателей нагружен больше чем остальные, это может привести к его перегреву и выходу из строя. При попадании в БПЛА постороннего объекта, вероятность отказа двух и более двигателей очень мала, нежели отказ одного двигателя, который наиболее вероятен. Обледенение лопастей БПЛА во время полета может быть проблемой, так как это может привести к утрате подъемной силы и контроля над БПЛА. Ледяные образования на лопастях могут также привести к нестабильному полету, в следствии обледенения получают ущерб все моторы БПЛА, но при ветре, во время такой погоды опять же будет более нагружен только один из двигателей.

Выявив, что при падении БПЛА чаще всего страдает только один из моторов, стало понятно, что это одна из главных проблем.

Анализ открытых источников в сети интернет, показал, что не существует алгоритмов стабилизации беспилотных летательных аппаратов во время выхода из строя одного из двигателей. В закрытом доступе есть алгоритмы стабилизации БПЛА от корпорации DJI, но они могут использоваться исключительно на БПЛА самой корпорации или ее партнеров.

В открытом доступе есть только одно исследование [9], в котором авторы определяют момент падения, но не предоставляют ходов решения проблемы посадки БПЛА при отключении одного двигателя.

В исследовании, проведенном авторами [9], для определения падения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) были использованы платформа Arduino и акселерометр GY-521. С помощью этих устройств исследователи определяли нормальное положение БПЛА. В нормальном положении светодиод, подключенный к Arduino, отображал синий цвет, а при возникновении риска падения аппарата светодиод начинал мигать желтым, а при фактическом падении - гореть красным цветом.

В одном из подходов для смягчения падения использовался экстренный выброс парашюта, однако в настоящее время использование парашюта [7, 10] при неисправности БПЛА в городских условиях и при доставке грузов, представляет определенные ограничения и недостатки. Данная система не способствует решению множества возникающих проблем. Например, парашют может зацепиться за винты БПЛА, что создает дополнительные опасности и риски. Кроме того, такой способ посадки не гарантирует плавного и ровного приземления, что может привести к повреждению груза и столкновению с другими объектами, людьми и т.д.

Парашютная система остается недоработанной, поскольку время срабатывания экстренной системы в момент падения и место приземления, которое может быть населено людьми, вызывают сомнения в ее эффективности и безопасности. Такой метод решения проблемы создает иллюзию обеспечения безопасности, но на практике не решает проблему безопасной посадки БПЛА. Большинство компаний пренебрегают вопросами безопасности, не устанавливают системы предотвращения падения или не раскрывают информацию о доступных системах безопасности, которые могут быть установлены на их БПЛА.

Таким образом, требуется дальнейшее исследование и разработка эффективных систем безопасности для обеспечения надежной посадки БПЛА в экстренных ситуациях. Необходимо учитывать различные аспекты, такие как скорость срабатывания системы, точность определения падения, контроль над посадкой и предотвращение столкновений. Это позволит обеспечить безопасность операций с БПЛА и повысить доверие к их использованию в интеллектуальной транспортной среде.

## 2. Подход к решению

Целью данного исследования является разработка универсального алгоритма для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на основе упрощенной и моделируемой ситуации, используя данные от полетного контроллера БПЛА.

Упрощение модели заключается в предположении идеальных условий окружающей среды и особенностей конструкции БПЛА. Конкретно, предполагается, что центр масс БПЛА находится в середине рамы, что означает равномерное распределение веса на все моторы. Также предполагается упрощенная модель для груза, при которой он располагается в центре масс БПЛА, что не противоречит данной упрощенной модели.

Управление моторами в БПЛА мультироторного типа осуществляется с помощью электрических ключей ESC, которые преобразуют ШИМ-сигнал в напряжение на моторе. Для задач ориентации и стабилизации полетного контроллера используется обратная связь, основанная на инерциальном измерительном блоке, включающем гироскопы, акселерометры, барометр и другие измерительные устройства.

Для достижения цели предлагается провести исследование причин выхода из строя двигателей, изучить поведение алгоритмов управления БПЛА при отключении одного двигателя во время полета или при изменении тяги двигателя. Также предлагается разработать автоматизированный подход для обнаружения неисправного двигателя в процессе эксплуатации и разработать алгоритм действий в случае изменения тяги или выхода из строя одного из двигателей. Для проверки разработанных алгоритмов предлагается провести виртуальное тестирование.

Для выработки комплексного универсального решения автором предлагается провести исследование причин выхода из строя двигателей, исследовать на предмет поведения алгоритмов управления БПЛА при отключении одного двигателя во время полета или изменения тяги двигателя, предложить автоматизированный подход для нахождения неисправного двигателя в процессе эксплуатации, разработать алгоритм действий в случае изменения тяги или выхода из строя одного из двигателей, провести виртуальное тестирование наших алгоритмов.

Результат исследований [11, 12] проблематики выхода из строя двигателей показал следующие наиболее часто встречающиеся проблемы:

1) Поломка пропеллера на одном или нескольких двигателях при внешнем воздействии. Это включает случаи, когда пропеллер сталкивается с препятствиями, получает механические повреждения или разрушается под действием внешних сил. Такие поломки грозят неправильным поведением БПЛА в полете, так как неисправный пропеллер может вызывать дисбаланс и нарушение устойчивости полета.

2) Перегрев самого двигателя. Эта проблема чаще всего возникает вследствие неправильного или некачественного подключения двигателя к питанию или неправильного использования системы охлаждения. Перегрев может привести к повреждению компонентов двигателя, его деформации или полной потере работоспособности, что может привести к его отказу и недостаточной тяге.

3) Проблемы с питанием и/или связью с полетным контроллером, вызванные повреждением проводов, подключенных к двигателю. Неправильное подключение, физическое повреждение или некачественные провода могут вызывать сбой в передаче электрического сигнала или потерю связи с полетным контроллером. Это может привести к неправильной работе двигателя, его отключению или неравномерному управлению, что в свою очередь влияет на управляемость и стабильность полета БПЛА;

4) Выход из строя двигателя из-за воздействия внешних факторов, таких как попадание воды. Внешние факторы могут вызывать повреждение или коррозию компонентов двигателя, что приводит к его отключению и потере управления. Например, попадание воды в двигатель может привести к короткому замыканию или повреждению электронных компонентов, что вызывает его неработоспособность.

Глобально, все эти причины можно разделить на две основные группы - выход из строя двигателя и повреждение лопасти. Во всех указанных случаях поломка влияет на полет БПЛА, и любая из этих проблем приводит к неизбежному падению.

Таким образом при обнаружении поломки на одном из двигателей, на полетном контроллере должна быть выполнена приоритетная задача выключение двигателя.

На рисунке 1 представлен алгоритм, который основываясь на параметрах инерциальной навигационной системы и процентной загруженности двигателей, определяет поврежденный двигатель и выключает его. Алгоритм привязан к плоскости XYZ.

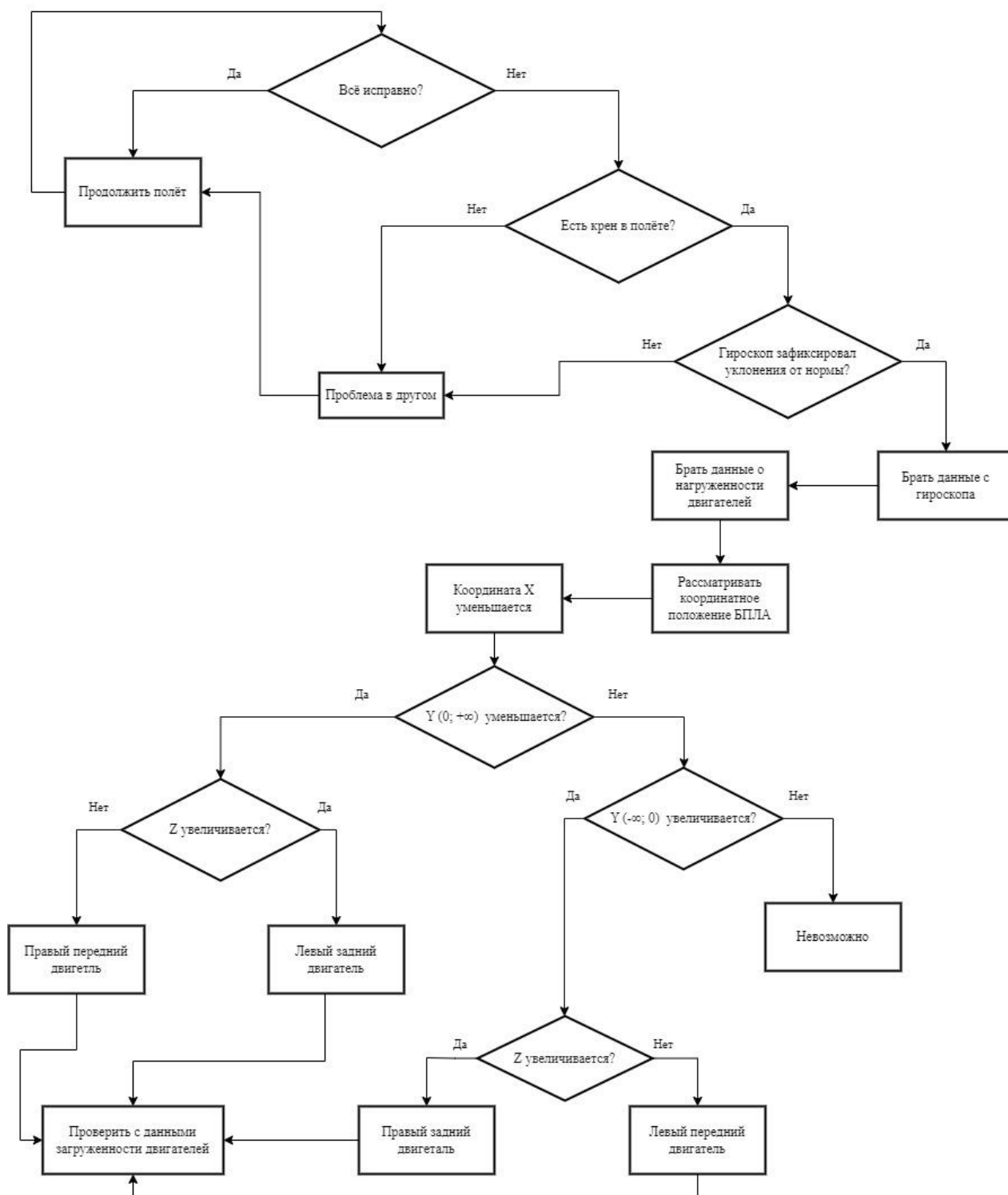


Рис. 1. Алгоритм нахождения неисправного двигателя

Алгоритм работы для определения неисправного двигателя включает использование координатной плоскости, связанной с основной плоскостью, привязанной к полетному контроллеру БПЛА. На рисунке 2 представлена эта отдельная координатная плоскость.

В данной плоскости рассматриваются координаты двух передних двигателей БПЛА. Координаты представлены на прямых  $X \in [0; +\infty)$ ,  $Y$  в случаях  $[0; +\infty)$  и  $(-\infty; 0)$ , а также на координатной прямой  $Z$  полностью. При полете БПЛА меняет свое координатное положение относительно географической плоскости, однако плоскость, привязанная к БПЛА, движется вместе с ним.

В момент, когда система опознает экстренную ситуацию, координатная плоскость  $XYZ$  становится статичной относительно последнего зафиксированного действия БПЛА. При начале работы алгоритма он возвращает БПЛА в положение плоскости  $XYZ$  (см. рисунок 3). Затем побочная плоскость

переходит в положение плоскости  $XYZ_1$ , и квадрокоптер начинает выравниваться по новым координатам, приходя в горизонтальное положение.

Таким образом, алгоритм работает путем сравнения координат передних двигателей БПЛА в отдельной координатной плоскости с фиксированными значениями, соответствующими горизонтальному положению БПЛА. При обнаружении отклонения от нормы, система понимает, что произошла экстренная ситуация, и запускает алгоритм коррекции. Алгоритм направляет БПЛА к возвращению в положение плоскости  $XYZ$  и далее выравнивает его по новым координатам, обеспечивая горизонтальное положение.

Такой подход позволяет обнаружить и реагировать на возможный выход из строя одного из двигателей, возвращая БПЛА в стабильное положение и предотвращая падение. Этот алгоритм способствует обеспечению безопасности и стабильности полета БПЛА в случае неисправности двигателя.

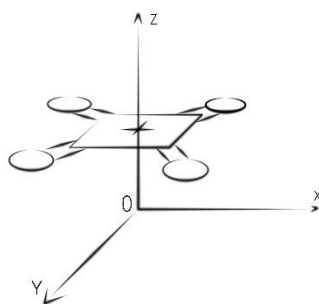


Рис. 2. Координатная плоскость БПЛА

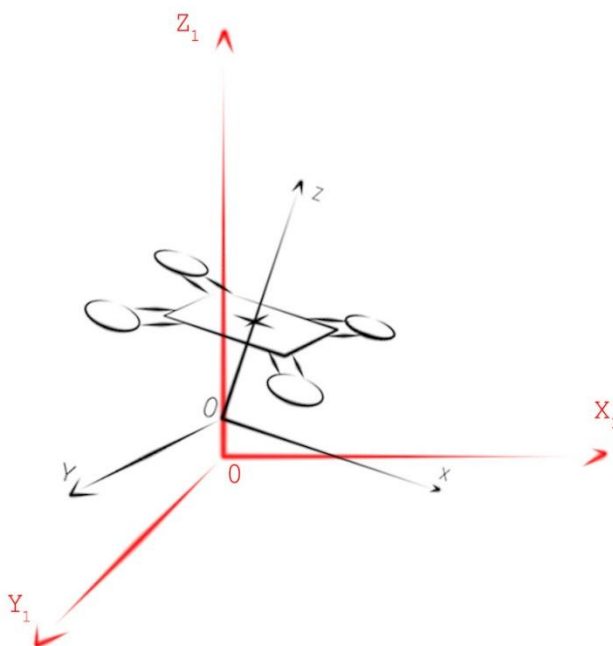


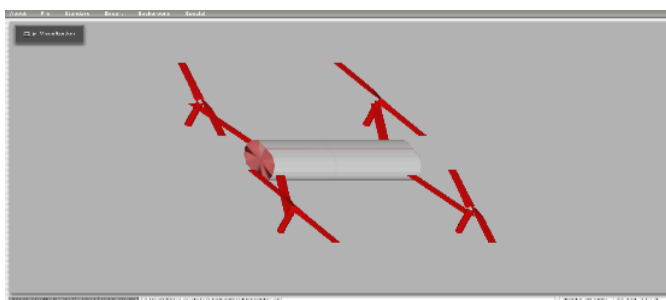
Рис. 3. Две плоскости, при движении БПЛА

После успешной стабилизации БПЛА и достижения горизонтального положения, программа системы отключает двигатель, находящийся по диагонали от неисправного двигателя. Затем система плавно начинает уменьшать подачу газа, что приводит к постепенному снижению высоты БПЛА и контролируемой посадке на землю.

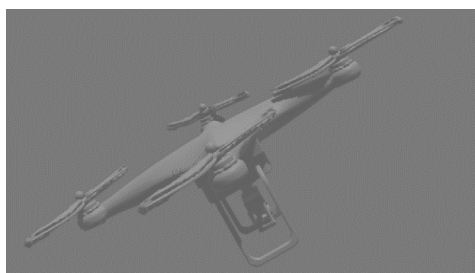
Для проверки работоспособности системы были проведены имитационные испытания с использованием программы X-Plane (см. рисунок 4). Во время испытаний БПЛА находился в идеальных условиях, не подвергаясь воздействию внешних сил, например, таких, как ветер, дождь, температура окружающей среды.

Дополнительно были установлены специальные дополнения для существующей версии приложения, которые включали в себя модель БПЛА мультиторного типа (см. рисунок 5). Эти дополнения позволили имитировать работу реального БПЛА и проверить функциональность системы в симулированных условиях.

Использование имитационных испытаний в программе X-Plane позволило проверить эффективность разработанного алгоритма и системы безопасной посадки БПЛА при выходе из строя одного из двигателей. Такой подход обеспечил контролируемую и безопасную посадку БПЛА даже в экстренных ситуациях.



*Рис. 4. Модель в программе X-Plane*



*Рис. 5. Модель 2 в программе X-Plane*

### **3. Заключение**

Проведенное исследование, вносит вклад в развитие и область моделирования динамических технических систем для обеспечения безопасности в интеллектуальной транспортной среде.

Прежде всего, наше исследование предлагает новый подход к моделированию поведения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в случае выхода из строя одного из двигателей. Рассмотрена упрощенная модель БПЛА, учитывающая его основные характеристики и параметры, что позволяет произвести анализ динамики полета в экстренных ситуациях. Такой подход позволяет более эффективно и реалистично моделировать возможные проблемы, связанные с выходом из строя двигателей, и разрабатывать соответствующие алгоритмы и решения для обеспечения безопасности полета.

Кроме того, наше исследование предлагает комплексное решение, включающее разработку алгоритмов и программного обеспечения для аварийной посадки БПЛА при выходе из строя одного из двигателей. Эти алгоритмы и решения основываются на представленной модели и позволяют системе эффективно обнаруживать неисправности, предотвращать потенциальные аварийные ситуации и обеспечивать контролируемую и безопасную посадку БПЛА. Такой подход способствует обеспечению безопасности в интеллектуальной транспортной среде и предлагает реалистичные решения для управления рисками в случае выхода из строя двигателей.

Таким образом, данное исследование вносит вклад в область моделирования динамических технических систем для обеспечения безопасности в интеллектуальной транспортной среде, предлагая новый подход к моделированию поведения БПЛА и разрабатывая комплексное решение для аварийной посадки. Наш подход отличается реалистичностью и эффективностью, и может быть применен для обеспечения безопасности и надежности полетов в различных сценариях и условиях эксплуатации.

## Литература

1. *Riley Panko* Drone delivery increases purchase intent for more than one-third of consumers // PRNewswire – 2020.
2. *Sarina Carter, Tore Johnston, Stephan Lidel, Robin Riedel, Leonard Tusch* Drone delivery: More lift than you think // McKinsey's office – 2022.
3. Беспилотная авиапочта // Wikipedia – 2023.
4. *Рябова В.* Лаборатория «Инвитро» первой использовала дрона для доставки биоматериалов // D-Russia – 2015.
5. Yota доставляет на дронах // Telecom Daily – 2015.
6. «Газпром нефть» успешно испытала на месторождении в ХМАО беспилотник для доставки проб нефти // Газпром нефть – 2020.
7. *Devin Coldewey* Drone crash near kids leads Swiss Post and Matternet to suspend autonomous deliveries // TechCrunch – 2019.
8. *Горбунов А.А., Галимов А.Ф.* Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2016. - С. 7-15.
9. *Imran Mir, Adnan Maqsood, Suhail Akhtar* Dynamic Modeling & Stability Analysis of a Generic UAV in Glide Phase // MATEC Web of Conferences – 2017.
10. *Овинов А.В., Шаров Д.С.* Способ парашютной посадки беспилотного летательного аппарата и беспилотный летательный аппарат с электродвигателем и парашютной системой посадки // Worldwide applications - 2014.
11. *James Cabahug, Hossein Eslamiat* Failure Detection in Quadcopter UAVs Using K-Means Clustering // MDPI and ACS Style – 2022.
12. *Bulent Ayhan, Chiman Kwan, Bence Budavari, Jude Larkin, David Gribben* Path Planning for UAVs with Engine Failure in the Presence of Winds // IEEE Xplore – 2018.