

3. ГОСТ Р 56829-2015. Интеллектуальные транспортные системы. Термины и определения, ГОСТ Р от 2015 года.
4. Газета «Гудок». Цифровизация транспорта – это политика государства - №1.2020.
5. Правительство России [Электронный ресурс] // О цифровой трансформации транспортного комплекса Режим доступа: <http://government.ru/news/34821/> (дата обращения: 10.10.2020).
6. Евразийская экономическая комиссия. Цифровизация транспорта и инфраструктуры. №2.
7. Forbes Contributor. [Электронный ресурс] // «Общество 5.0»: японские технологии для цифровой трансформации российской экономики. Режим доступа: <https://www.forbes.ru/partnerskie-materialy/367837-obshchestvo-50-yaponskie-tehnologii-dlya-cifrovoy-transformacii> (дата обращения: 11.10.2020).
- Общество 5.0»: японские технологии для цифровой трансформации российской экономики
8. GSM [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://pcradar.ru/standarty-sotovoy-svyazi-gsm/> (дата обращения: 10.10.2020).
- lab.ru/blog/500284.php?nomobile=1 (data obrashcheniya: 10.10.2020).
2. Nikolaeva R. V., Gazizova Z. S., Zagidulina A. D. Formirovanie i razvitiya intellektual'nykh transportnykh sistem. // Tekhnika i tekhnologiya transporta - №1.2016.
3. GOST R 56829-2015. Intellektual'nye transportnye sistemy. Terminy i opredeleniya, GOST R ot 2015 goda.
4. Gazeta «Gudok». Cifrovizaciya transporta – eto politika gosudarstva - №1.2020.
5. Pravitel'stvo Rossii [Elektronnyj resurs] // O cifrovoy transformacii transportnogo kompleksa Rezhim dostupa: <http://government.ru/news/34821/> (data obrashcheniya: 10.10.2020).
6. Evrazijskaya ekonomicheskaya komissiya. Cifrovizaciya transporta i infrastruktury. №2.
7. Forbes Contributor. [Elektronnyj resurs] // «Obshchestvo 5.0»: yaponskie tekhnologii dlya cifrovoy transformacii rossijskoj ekonomiki. Rezhim dostupa: <https://www.forbes.ru/partnerskie-materialy/367837-obshchestvo-50-yaponskie-tehnologii-dlya-cifrovoy-transformacii> (data obrashcheniya: 11.10.2020).
- Obshchestvo 5.0»: yaponskie tekhnologii dlya cifrovoy transformacii rossijskoj ekonomiki
8. GSM [Elektronnyj resurs] // Rezhim dostupa: <https://pcradar.ru/standarty-sotovoy-svyazi-gsm/> (data obrashcheniya: 10.10.2020).

References

1. Otkrytye Innovacii.2018 [Elektronnyj resurs]// Koleznikov A.- Rezhim dostupa: [УДК 004.942](https://smart-</div><div data-bbox=)

DOI: 10.34046/aumsuomt99/21

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВОГО СПОСОБА ПОСАДКИ КВАДРОКОПТЕРА НА НАКЛОННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

*И.И. Бузенков, кандидат технических наук, доцент,
С.О. Малахов, кандидат экономических наук, доцент
Ф.Ф. Оленко, преподаватель*

В данной статье рассматриваются способы и программно-аппаратные средства для моделирования, и разработки принципиально нового способа посадки квадрокоптера на наклонных поверхности. Обусловлено и описано нынешнее состояние разрабатываемого проекта. Ввиду сложности рассматриваемой задачи возможны различные подходы к ее решению, отличающиеся как распределением функций управления между наземным пунктом управления и самим квадрокоптером, так и выбором принципов, которые могут быть положены в основу системы управления и определяют ее конструктивные и динамические характеристики. Посредством моделирования и тестирования продемонстрировано, что одна только обратная тяга может увеличить зону приземления небольшого квадрокоптера, почти вдвое увеличив максимальный угол наклона, на котором он может приземлиться, обеспечив приземление с высокой вертикальной скоростью. Это может быть полезно в ситуациях, когда вероятно возникновение внезапных помех.

Ключевые слова. Квадрокоптер, беспилотный летательный аппарат, программно-аппаратный комплекс, робототехнические системы, посадка с помощью обратной тяги, реверсная тяга.

MODELING AND DEVELOPMENT OF A PRINCIPALLY NEW METHOD OF LANDING A QUADROCOPTER ON INCLINED SURFACES

I.I. Buzenkov, S.O. Malakhov, F.F. Olenko

This article discusses methods and software and hardware for modeling, and the development of a fundamentally new method of landing a quadcopter on inclined surfaces. The current state of the project under consideration is determined and described. In view of the complexity of the problem under consideration, various approaches to its solution are possible, differing both in the distribution of control functions between the ground control station and the quadcopter itself, and in the choice of principles that can be used as the basis for the

control system and determine its constructive and dynamic characteristics. It has been demonstrated through simulations and testing that reverse thrust alone can increase the landing area of a small quadcopter, nearly doubling the maximum tilt angle at which it can land, enabling a landing at high vertical speed. This can be useful in situations where sudden interference is likely to occur.

Key words. Quadcopter, unmanned aerial vehicle, hardware and software system, robotic systems, reverse thrust landing, reverse thrust.

Использование необитаемых летательных аппаратов (БПЛА) в гражданских целях в последние годы сильно увеличилось, поскольку они становятся более доступными, универсальными и безопасными для полета. Однако подавляющее большинство коммерческих мультикоптеров имеет ограниченную зону посадки и рекомендуются для посадки только на плоские горизонтальные поверхности. Наклонные поверхности могут привести к опрокидыванию БПЛА из-за изменения направления тяги и жесткой подвески БПЛА [1]. Кроме того, типичные контроллеры полета запрограммированы на то, чтобы двигатели оставались включенными, пока происходит даже самая минимальная активность внутренних систем БПЛА, что может привести к непрерывному движению вниз по небольшим уклонам.

Новые мультикоптеры оснащены датчиками обзора, установленными на нижней части их корпуса, которые, в свою очередь, помогают им находить подходящие места для приземления во время автоматической посадки [3, 6]. Увеличение диапазона посадки мультикоптеров может открыть широкий спектр возможностей для усовершенствования программно-аппаратной части за счет увеличения количества возможных зон или ситуаций посадки; в жилых районах, например, БПЛА смогут осуществить посадку на наклонные крыши.

В данной статье рассмотрены аспекты моделирования и разработки принципиально нового способа посадки квадрокоптера на наклонные поверхности с помощью обратной тяги [4]. В отличие от таких способов приземления БПЛА как приземление с использованием пассивных методов адгезии (микрошпы и сухие клеи), с использованием маневренности мультиротора для создания высокодинамичных маневров для приземления и прилипания на наклонных поверхностях, а также приземление с использованием небольших бортовых лазеров камеры для измерения наклона посадочной площадки, посадка с помощью обратной тяги не принуждает разработчиков БПЛА использовать в их проектах квадрокоптеры с низким центром тяжести, а, соответственно, и малых весов, что облегчает маневренность, но значительно

понижает грузоподъемность, функционал, работоспособность и качество используемого на нем оборудования [2, 6]. Причем, имеется еще один значительный недостаток, заключающийся в том, что мультикоптер становится более восприимчивым к погодным помехам, во время взлета и захода на посадку, таким как порывы ветра, дождь или снег.

Мультикоптер имеет несколько узлов для управления движением в пространстве, которые состоят, в свою очередь, из двигателя и пропеллера [5]. Каждый из этих узлов вращается с разными скоростями, создавая осевую силу на оси ротора и крутящий момент вокруг оси [9, 10]. Все эти силы создают результирующую силу тяги и моменты в трех основных осях квадрокоптера. Тогда становится очевидным, что обычные мультироторы – это машины с недостаточным приводом: у них шесть степеней свободы, но задействованы только четыре из них. Кроме того, сила роторов не может быть «отрицательной» (по направлению к основанию коптера), поскольку контроллеры двигателей (ESC) позволяют вращать роторы только в одном направлении [10].

Технологии, существующие на мультироторах, позволяют мультикоптерам приземляться только на устойчивые горизонтальные поверхности. Действительно, они не могут приземлиться на наклонные поверхности, и это частично связано с перенаправлением тяги после первоначального удара (механическое ограничение мультикоптеров) и их полетным контроллером, предотвращающим отключение роторных двигателей до тех пор, пока коптер не перестанет движение (ограничение программного обеспечения). Следовательно, чтобы приземлиться на наклонной поверхности, мультироторы должны совершать высокодинамичный маневр. Дрон должен наклониться и направить вектор тяги в сторону склона, чтобы приблизиться к нему. Но в такой ориентации дрон врежется в склон [8]. Он должен изменить свою ориентацию, создав момент за счет разностной тяги роторов, и выровнять свой вектор тяги почти перпендикулярно наклону, чтобы снизить скорость до удара. Если контакт произойдет слишком резко, дрон отскочит назад (см. рис. 1, рис. 2).

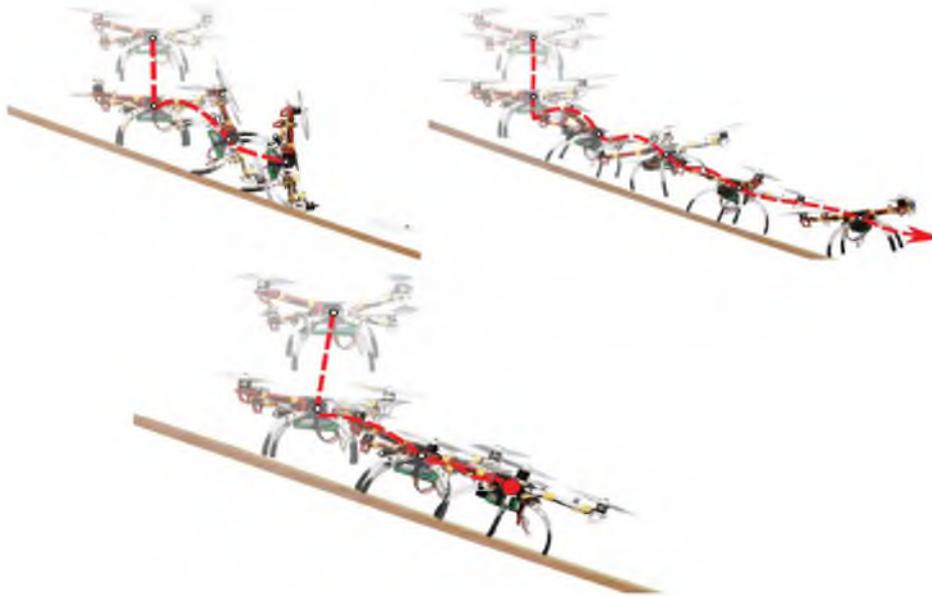


Рисунок 1 – Квадрокоптер перевернулся во время приземления на плоскость 25° (вверху слева), не приземлился из-за неопределенного отскока (вверху справа) и успешно приземлился с использованием обратной тяги (внизу)

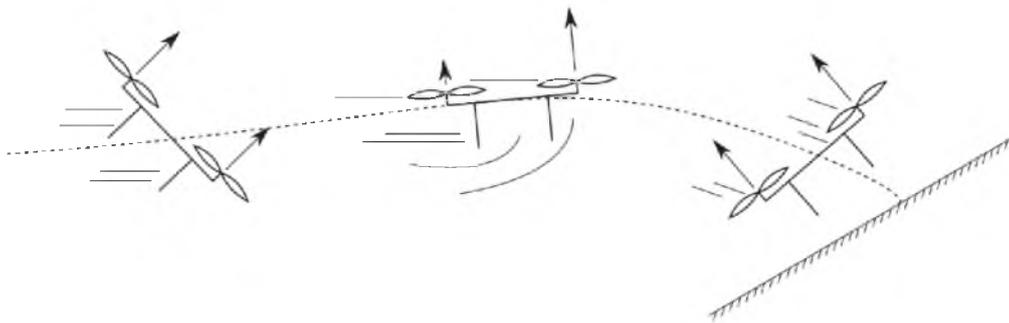


Рисунок 2 – Пример динамического маневра, позволяющего мультикоптерам приземлиться на наклонной поверхности

Чтобы успешно выполнить этот маневр, мультикоптер должен знать положение и угол наклона посадочной поверхности, а также свое положение по отношению к ней. Поэтому для этой задачи требуется специальная система локализации и наведения. Кроме того, сам маневр посадки мультикоптера чувствителен к внешним помехам и срабатыванию различных фаз маневра. Исходя из этого, коптеру необходимо скорректировать скорость вращения каждого мотора и, благодаря этому, изменить местоположение оси корпуса в пространстве относительно оси роторов. Благодаря же системе локализации и наведения осуществляется корректное приземление БПЛА на поверхность с неправильной ориентацией. Однако, главной задачей, как мультикоптера, так и оператора, является необходимость найти ком-

промисс между выравниванием дрона в пространстве и его скоростью приближения к наклонной поверхности [9, 10].

Однако, существует другой способ, используемый пилотами вертолетов при посадке на наклонную поверхность земли. Более безопасный, однако и более медленный. При посадке вертолета на наклонную поверхность используется циклическое управление для создания силы, действующей на несущий винт создавая тем самым наклон винта, когда одно из шасси вертолета касается земли (см. рис. 3). Медленно сокращая расстояние, пилот может твердо поставить второй край своего шасси на землю. Однако этот метод позволяет приземляться только на слегка наклонные поверхности, например, под углом 10° , что делает его крайне неэффективным при работе мультикоптера в экстремальных условиях [3].

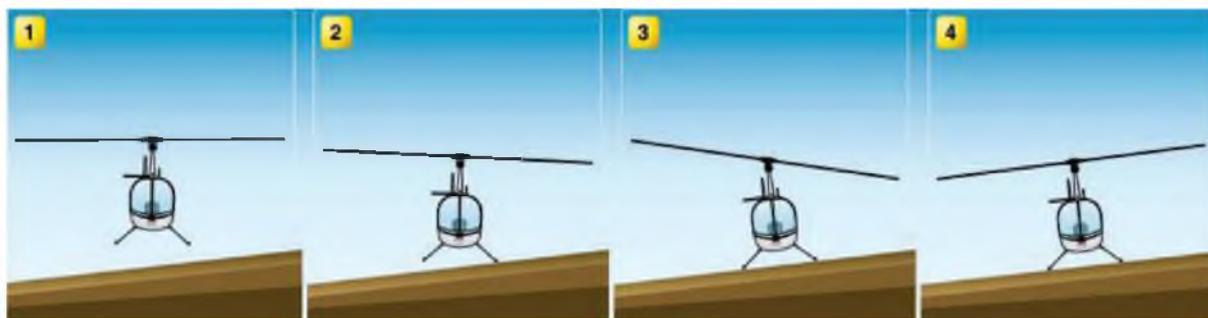


Рисунок 3 –Посадка вертолета на наклонную поверхность

Исходя из этого, наилучшим решением является использование новой технологии посадки мультикоптеров с помощью обратной тяги. Данная технология позволяет сделать подход к наклонной поверхности более быстрым, а коптер менее восприимчивым к окружающим помехам [1, 3]. Реверсивная тяга используется для понижения ударной силы, а также повышения эффективности трения, для рассеивания движущей энергии при посадке аппаратной системы на наклонную поверхность. Также значительно уменьшается угловое перемещение из-за отскоков, что позволяет сократить продолжительность и необходимое расстояние при приземлении [4, 11]. Использование реверсивной тяги не требует каких-либо революционных аппаратных и программных модификаций мультикоптера. Благодаря этому, а также благодаря высокой универсальности и практичности, разработка и внедрение данной технологии является крайне актуальной задачей в сфере беспилотных летательных аппаратов, что способствует реализации данной технологии в ближайшие несколько лет.

Для разработки принципиально нового способа посадки мультикоптера посредством обратной тяги была использована модель квадрокоптера типа DJI F450 с установленными на нее, вместо обычных посадочных ножек, специализированными посадочными ножками на торсионной пружине, которые позволяют коптеру при посадке более эффективно глушить удар о поверхность, а также сокращать площадь торможения. Для создания точного цифрового прототипа мультикоптера с технологией посадки посредством реверсивной тяги с подробным описанием всех его сегментов, мы использовали сразу несколько типов математических моделей в таких средах как Mathcad, Matlab, Autocad и AnyLogic [9, 10].

С помощью первой математической модели, она же игровая модель, была разработана динамическая модель для имитации посадки

квадрокоптера на нескольких наклонных поверхностях с разными углами наклона, а также разработаны несколько стратегий посадки. Предположив, что квадрокоптер хорошо ориентирован по поверхности перед маневром приземления, его движение можно рассматривать как в целом в двухмерной плоскости (т.е., крен и рыскание не превышают 10°), что упрощает модель за счет уменьшения количества уравнений движения и количества контактных расчетов. Модель с несколькими телами используется для моделирования поведения торсионного шасси квадрокоптера, которые изгибаются под действием посадочных нагрузок (см. рис. 4). В свою очередь, модель состоит из трех твердых тел: одного квадрокоптера, и двухпосадочных ножек. Использование 2D-моделей также компенсирует угловой момент роторов, что значительно упрощает поставленную задачу [5].

Далее, в совокупности с игровой была использована дескриптивная модель, для моделирования двух методов посадки с помощью обратной тяги и выбором между лучшим из них. Классический метод включает в себя отключение автопилотом всех своих двигателей, когда его инерциальный измерительный блок (IMU) обнаруживает удар [1, 6]. Другой метод заключался в том, чтобы просто приложить максимальную обратную тягу ко всем двигателям в момент удара, что увеличивает трение и уменьшает амплитуду отскоков, помогая квадрокоптеру быстро останавливаться.

Эти два метода посадки коптера были протестированы при моделировании в диапазоне углов наклона (от 0° до 45°) и вертикальных скоростей удара (от 0 до 2 м/с) на поверхностях с различным типом трения. Данное моделирование проводилось пять раз с использованием пяти лучших наборов параметров для коптера при посадке на наклонные поверхности с малым и большим трением [8].

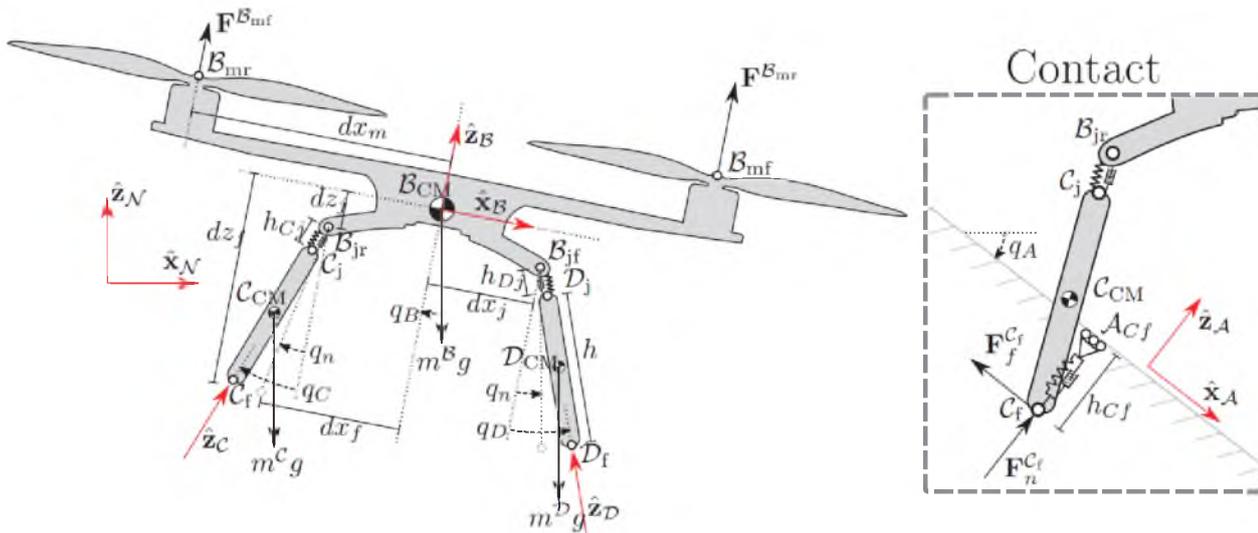


Рисунок 4 – Схема упрощенной модели квадрокоптера и посадочных шасси, системы отсчета и сил, действующих на динамическую модель, единичные векторы, ориентированные в плоскости XZ

Исходя из итогов моделирования, было вынесено и доказано, что посредством постепенного увеличения максимального наклона склона, на который коптер может приземлиться, использование обратной тяги в алгоритме посадки дает значительные преимущества в сравнении с другими механическими улучшениями коптера. Также было определено, что управление максимальной силой обратной тяги во время посадки в некоторое количество раз успешнее выполняет поставленную задачу в отличие от классического метода реверсной тяги. Управление максимальной силой обратной тяги также обеспечивает более быструю посадку в большем диапазоне возможных наклонов [10]. Однако, стоит заметить, что даже если угол наклона посадочной поверхности приближен к максимуму, приземление на поверхность с высокой силой трения будет сложной задачей. На этом типе поверхности квадрокоптер подвергается коротким контактам, но с частой последовательностью, вместо более длинных скользящих контактов, что приводит к меньшему рассеиванию энергии за счет трения. Среднее время, необходимое коптеру для посадки и полной остановки аппаратной системы, в два раза больше для поверхности с высоким трением, чем для поверхности с низким. При высокой же скорости и силе удара коптера при приземлении о поверхность с высоким трением увеличивается вероятность переворота мультикоптера [3, 7].

На рисунке 5 обозначена черная пунктирная линия, указывающая естественные аппаратные пределы квадрокоптера при посадке с использованием реверсной тяги и без нее. Фактически, на поверхности с низким коэффициентом

трения квадрокоптер будет скользить из состояния покоя только, если наклон поверхности превышает 22° . На поверхности же с высоким коэффициентом трения поверхности предел представляет собой наклон поверхности, при котором квадрокоптер опрокидывается из состояния покоя (35°), что произойдет до того, как должно произойти скольжение. При обратной тяге эти пределы увеличиваются до 48° и 67° , соответственно. Однако данные показатели не являются пределом для данной технологии. В ходе дальнейших исследований будут применены меры для повышения возможностей при посадке на наклонную поверхность. Кроме того, маломощные механизмы адгезии, такие как электроадгезия, переключаемые магниты, захваты или сухой клей, могут быть активированы после приземления, что позволит оставаться на поверхности после прекращения обратной тяги [12].

Также в программах математического моделирования Mathcad и Matlab были рассчитаны и смоделированы более двухсот сорока проверочных посадок с помощью обратной тяги, а также силы, потенциально влияющие на математическую протомодель программно-аппаратного комплекса БПЛА DJI F450. Управление квадрокоптером DJI F450 осуществлялось с помощью микроконтроллера Arduino Uno, платой расширения для подключения периферийных Arduino-модулей Adafruit Servo Shield, с помощью платы с Sparkfun Razor IMU (сбор данных с частотой 1 кГц и фильтрация с использованием низкочастотного фильтра и интегрированных в нее систем гироскопа, акселерометра и магнитометра) и с помощью устройства цифровой радиосвязи Xbee S1 для передачи данных. Микроконтроллер Arduino был

запрограммирован на простое поведение в пространстве во время посадки, главным условием модуляции являлось, то, что квадрокоптеру необ-

ходимо максимально избегать лишних отклонений в пространстве во время посадки [9].

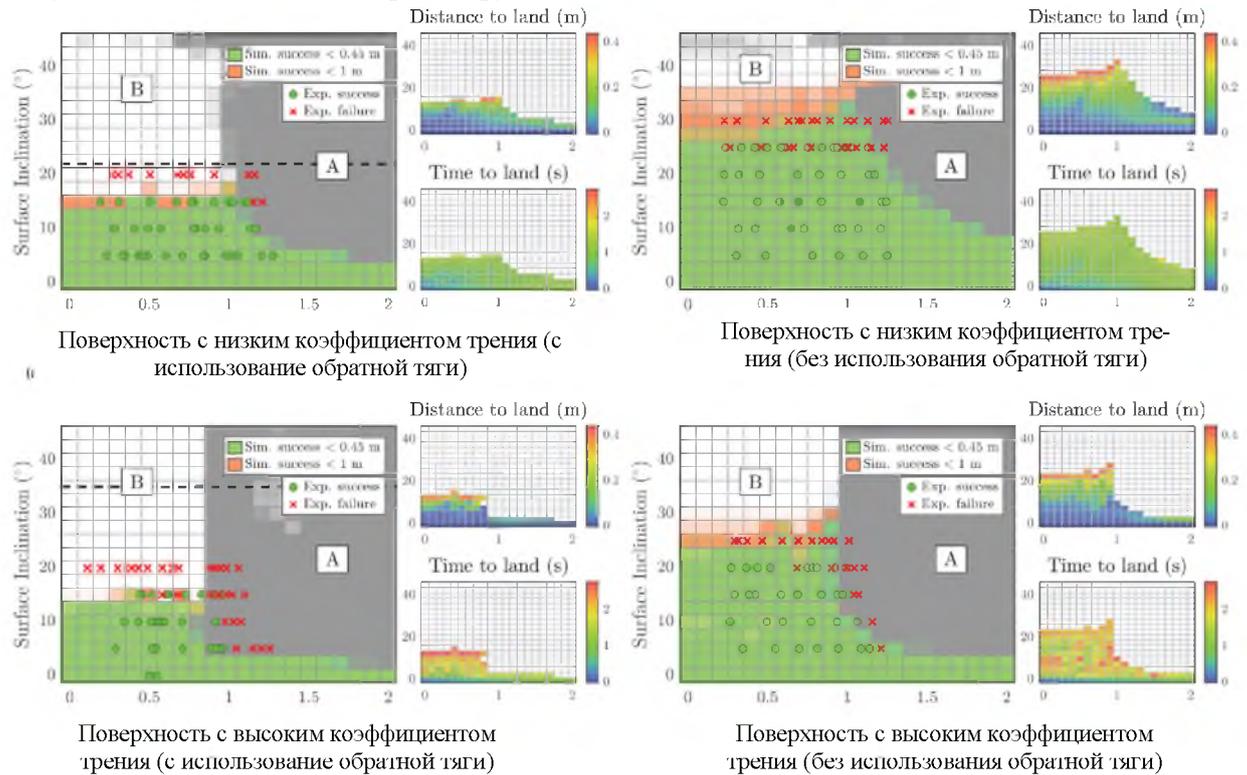


Рисунок 5 – Демонстрация посадки мультикоптера с помощью обратной тяги и без на поверхности с высоким и низким коэффициентами трения

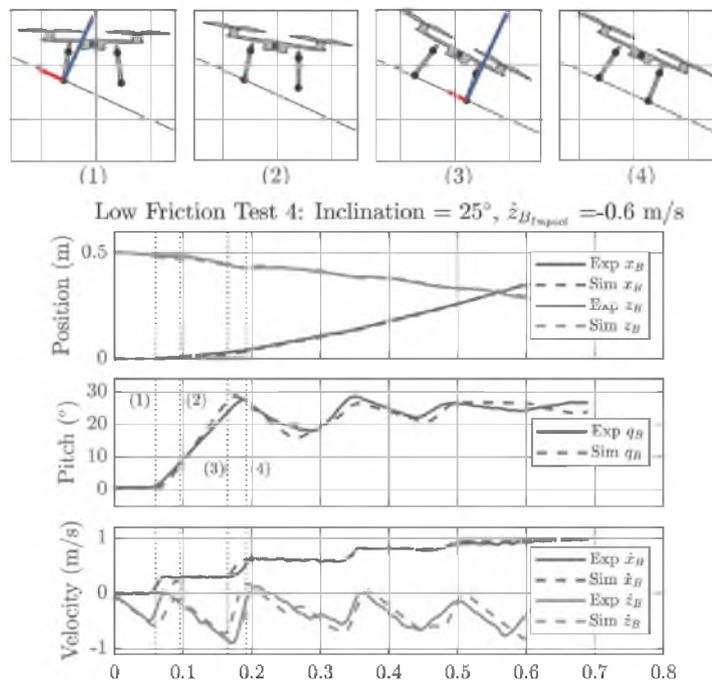


Рисунок 6 – Последовательное положение БПЛА при посадке на наклонную поверхность и показатели моделирования посадки на различные типы поверхности

При пороговом значении в $2g$, измеренном акселерометром, Arduino Uno активирует способ посадки квадрокоптера посредством обратной тяги при первом же столкновении. Скорость

удара регистрировалась с помощью системы захвата движения. Успешные и неудачные посадки были добавлены к картам посадки квадрокоптера. Падения поддерживались на скорости ниже

1,2 м / с, так как при более высоких скоростях удара, возможна вероятность поломки пластмассовых шасси [7]. Результаты экспериментов подтверждают смоделированные характеристики программно-аппаратной системы, а также точность динамической модели в момент посадки. Кроме того, после первоначального удара F450 совершает крен и рысканье в среднем около 19° и 27° соответственно. Это демонстрирует, что модель коптера является актуальной даже для прогнозирования диапазона посадки при значительных отклонениях от заданных 2-х мерных условий [9, 12].

На смоделированных картах посадки с использованием обратной тяги на поверхности с низким и высоким коэффициентом трения, продемонстрированные на рисунке №5, зеленая зона соответствует успешным посадкам в пределах 45 см от первого столкновения, тогда как оранжевая область обозначает возможные условия для успешного приземления в пределах 1 метра. Серая же зона, в свою очередь, означает, что квадрокоптер пролетел в пределах 1 м от места столкновения. Белая зона обозначает переворот квадрокоптера в ходе выполнения маневра посадки. Справа от карт расположены цифры, показывающие расстояние и время, необходимое для симуляции для F450, вплоть до полной остановки работы БПЛА. Черная пунктирная линия на схеме представляет предел трения для поверхности с низким коэффициентом трения, тогда как для поверхности с высоким она обозначает предел "опрокидывания" [7].

Как видно на рисунке 6, угловая скорость квадрокоптера увеличивается после удара задней ножкой, до тех пор, пока передняя ножка не коснется земли. Высокая угловая скорость при втором ударе заставляет квадрокоптер после этого либо продолжать подпрыгивать, либо опрокинуться. Это явление подчеркивается высокой

жесткостью шасси квадрокоптера и низким демпфированием. Однако, используя обратную тягу, можно сгенерировать угловой импульс для устранения угловой скорости перед вторым ударом. Используя данные о наклоне поверхности и прогнозируемой скорости удара, простое моделирование с прогнозированием может определить задержку и продолжительность этого углового импульса, необходимого для устранения угловой скорости квадрокоптера и приземлиться параллельно поверхности в момент второго удара. Поскольку импульс требует точной синхронизации, мощность бесколлекторных моторов сокращается до 10% при ударе, а после, в нужное время, генерируется импульс путем отправки сигнала через микроконтроллер Arduino Uno повышая мощность передних моторов до 80%. Эта стратегия позволяет избежать задержек разворота. После завершения импульса оба ротора получают команду на создание максимальной обратной тяги для облегчения сцепления с поверхностью[4].

Этот подход был протестирован в среде моделирования Matlab и AnyLogic с теми же диапазонами вертикальной скорости удара и наклонов склона, что и предыдущие моделирования, на обоих типах поверхностей. Чтобы найти оптимальную программно-аппаратную конфигурацию БПЛА, было смоделировано несколько комбинаций задержки импульса (время между ударом и началом импульса) и продолжительности – от 0 до 260 мс и от 0 до 160 мс соответственно – для каждой комбинации скорости и угла наклона. Была выбрана комбинация импульсов, минимизирующая угловую скорость в момент второго удара. Эта процедура была снова проведена для каждого из пяти лучших наборов параметров F450 для каждого типа поверхности[3]. Полученные средние значения модуляции представлены на карте посадки на рисунке 7.

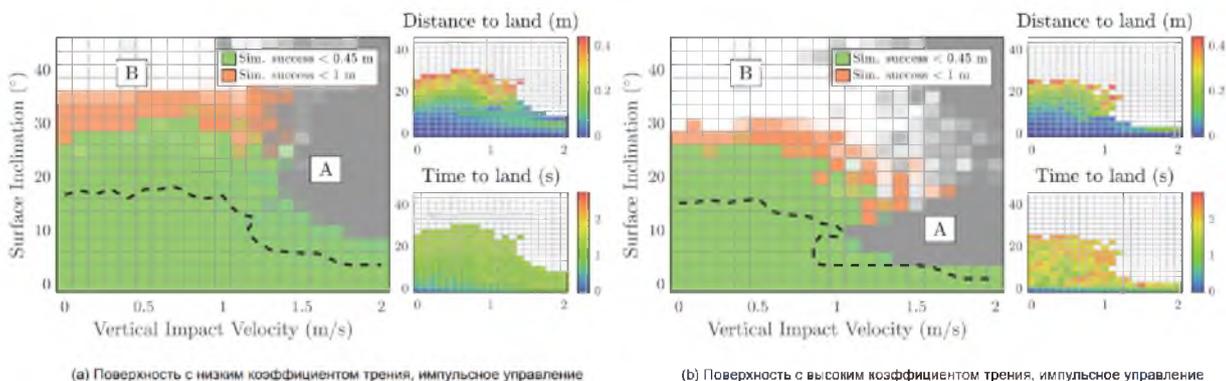


Рисунок 7 – Моделируемые карты посадки двух типов поверхностей для посадок с использованием импульсного управления

Этот метод немного увеличивает максимальный наклон, на котором квадрокоптер может приземлиться в пределах 1 м в более широком диапазоне скоростей приземления. Риски значительно уменьшаются, так как опрокидывание происходит реже [6]. Кроме того, как показано черной пунктирной границей на рисунке 7 использование обратной тяги необходимо для увеличения точно посадки. Однако стоит заметить, что только импульсный контроль обратной тяги сопоставим по

характеристике посадки на наклонную поверхность с базовым контролем посадки на горизонтальную поверхность [2, 9]. Это можно объяснить созданием в среде моделирования линейного импульса, благодаря которому дрон отталкивается от склона.

Полученная задержка и длительность импульса показаны на рисунке 8.

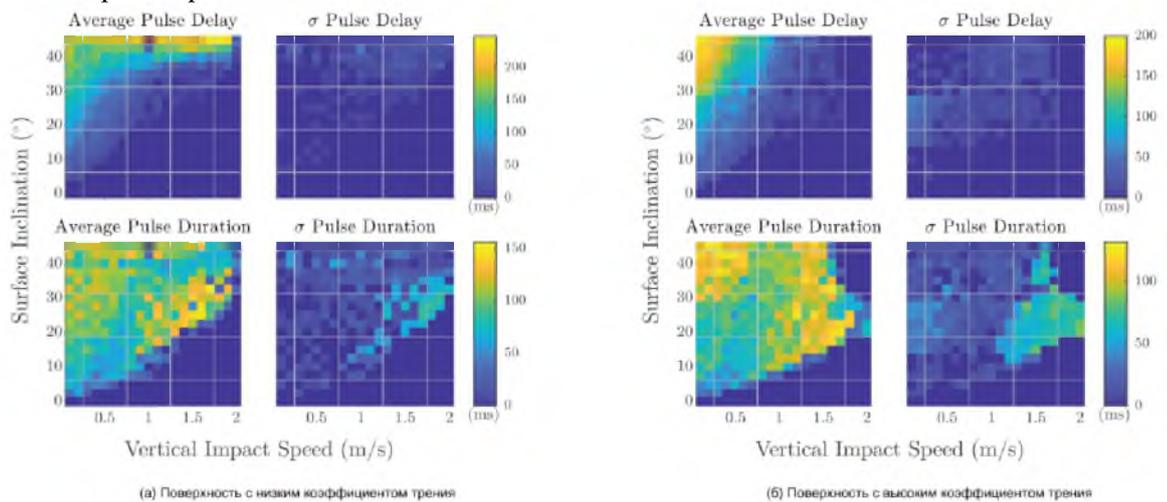


Рисунок 8 –Средняя задержка импульса и ее стандартное отклонение между пятью видами симуляций

При приземлении на небольшой уклон на высокой скорости микроконтроллер решает пропустить импульс и немедленно создает обратную тягу на обоих двигателях после удара [7]. В этой области второй удар происходит до того, как импульс сможет создать значительный противодействующий момент. Генерируемый угловой импульс также создает линейный импульс, в тот самый момент, когда квадрокоптер наклонен впе-

ред, чтобы избежать задержки разворота, отталкивая БПЛА от уклона. При идеальном реверсе двигателя чистый угловой импульс может быть быстро сгенерирован с использованием обратной тяги, обеспечивая более эффективный маневр при посадке [8].

Описанный ранее эксперимент был смоделирован путем устранения задержки разворота. Полученные данные посадки представлены на рисунке 9.

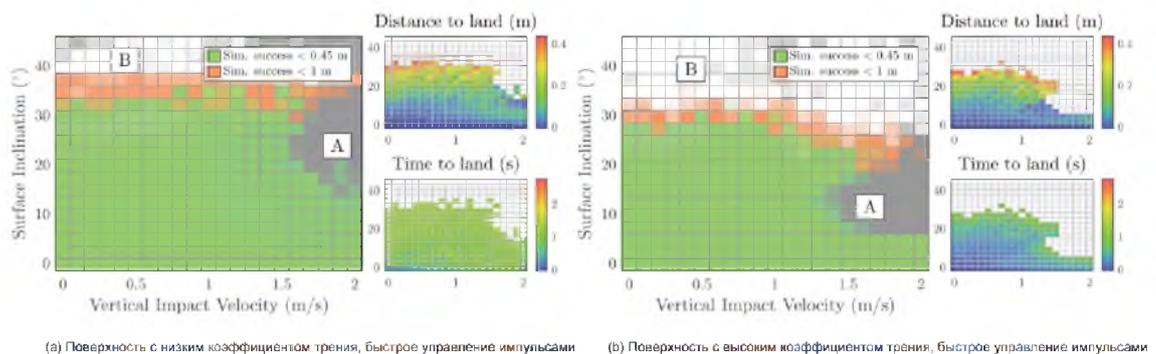


Рисунок 9 – Карты посадки для поверхностей с использованием импульсного управления и более быстрых двигателей

В итоге, более быстрое реверсирование тяги расширило зону посадки значительно больше, чем импульс с обычными двигателями, а также сузил зону отказа. Время, не-

обходимое для приземления также уменьшилось, особенно для поверхности с высоким коэффициентом трения, демонстрируя, что улучшение технологии реверсирования двигателя может существенно способствовать

улучшению посадке мультикоптеров. Более быстрое реверсирование двигателя может быть реализовано с использованием двигателей с датчиком или роторов с регулируемым шагом [4].

В заключение следует отметить, что в данной статье была описана разработка и моделирование принципиально новой технологии посадки мультикоптеров на наклонные поверхности с помощью обратной тяги совместно с использованием технологии двунаправленных двигателей. Посредством моделирования и тестирования было продемонстрировано, что одна только обратная тяга может увеличить зону приземления небольшого квадрокоптера, почти вдвое увеличив максимальный угол наклона, на котором он может приземлиться, и обеспечив приземление с высокой вертикальной скоростью. Это может быть полезно в ситуациях, когда вероятно возникновение внезапных помех (например, приземление на крышу в ветреную погоду). Этот результат был достигнут с использованием классического квадрокоптера типа DJI F450 без добавления какого-либо оборудования [5].

Также использование углового импульса после первоначального удара способствовало маневру при приземлении, устраняя нежелательные последующие отскоки. Кроме того, более быстрое изменение тяги значительно увеличивало точность посадки. Дальнейшая разработка будет включать испытания с использованием предложенных решений на физической модели. Используя разработанную в данной научной работе модель, ее параметры будут скорректированы для определения жесткости и демпфирования идеальных шасси, чтобы минимизировать подпрыгивание и опрокидывание [3]. Наконец, предложенный метод может быть применен для приземления на движущиеся поверхности, такие как палуба лодки или высокоскоростного транспортного средства [11, 12].

Литература

1. Ситников Д.В. Автопилот мультикоптера / Д.В. Ситников, Ю.А. Бурьян, Г.С. Русских // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – №7.
2. Златин И. Возможности программы Matlab для моделирования в программе Simulink / И. Златин И., С. Кадышев // Компоненты и Технологии. – 2004. – №37. – С. 164-165.
3. Огольцов И.И. Математическая модель квадрокоптера аэромобильного лидера / И.И. Огольцов, Н.Б. Рожнин, В.В. Шеваль // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – №1.
4. Губарев С.А. Изменение функциональности и структур беспилотных летательных аппаратов для гражданского назначения / С.А. Губарев, Е.Р. Шин // Вектор ГеоНаук. – 2020. – №2.
5. Шеврикуко Ю.Ф. Исследование и разработка алгоритмов управления беспилотными летательными аппаратами для мониторинга природных и техногенных объектов / Ю.Ф. Шеврикуко, С.Б. Волопин, М.А. Ковалева // Естественные и математические науки в современном мире. – 2015. – №6 (30).
6. Харьков В.П. Управление вектором скорости полета летательного аппарата на основе энергетического подхода / В.П. Харьков, С.П. Халютин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – №213 (3).
7. Гэн, К., Чулин Н.А. Алгоритмы стабилизации для автоматического управления траекторным движением квадрокоптера / К. Гэн, Н.А. Чулин // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2015. – №5.
8. Ющенко, А.С. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети / А.С. Ющенко, К.Р. Лебедев, Х. Забихафар // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2017. – №7.
9. Калугин, А.И. Оптимизационный эксперимент в среде AnyLogic / А.И. Калугин // Наука и школа. – 2015. – №4.
10. Федотова, В.С. Технологии имитационного моделирования в системе AnyLogic / В.С. Федотова // Царскосельские чтения. – 2013. – №XVII.
11. Попов, А.Н. Алгоритм эксплуатационной надежности большой морской системы связи и идентификации судов береговыми центрами в концепции развития e-Навигации / А.Н. Попов, Д.Г. Черноглазов, А.Ю. Татаров // Транспортное дело России. – 2019. № 1. С. 171-174.
12. Астреин, В.В. Методологические основы распределенной автоматизированной системы управления безопасностью судовождения / В.В. Астреин, С.И. Кондратьев, А.Л. Боран-Кешишьян // Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – № 3 (96). – С. 59-64.

REFERENCES

1. Sitnikov, D.V. Avtopilot mul'tikoptera / D.V. Sitnikov, Yu.A. Bur'yan, G.S. Russkikh // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2012. – №7.
2. Zlatin I., Vozmozhnosti programmy Matlab dlya modelirovaniya v programme Simulink / I. Zlatin I., S. Kadyshchev // Komponenty i Tekhnologii. – 2004. – №37. S. 164-165.
3. Ogol'tsov, I.I. Matematicheskaya model' kvadrokoptera aeromobil'nogo lidara / I.I. Ogol'tsov, N.B. Rozhnin, V.V. Sheval' // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. – 2012. – №1.

4. Gubarev, S.A., *Izmenenie funktsional'nosti i struktur bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya grazhdanskogo naznacheniya* / S.A. Gubarev, E.R. Shin // *Vektor GeoNauk*. – 2020. – №2.
5. Shevrikuko, Yu.F. *Issledovanie i razrabotka algoritmov upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami dlya monitoringa prirodnykh i tekhnogennykh ob"ektov* / Yu.F. Shevrikuko, S.B. Voloshin, M.A. Kovaleva // *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire*. – 2015. – №6 (30).
6. Khar'kov, V.P. *Upravlenie vektorom skorosti poleta letatel'nogo apparata na osnove energeticheskogo podkhoda* / V.P. Khar'kov, S.P. Khalyutin // *Nauchnyy vestnik MGTU GA*. – 2015. – №213 (3).
7. Gen, K., Chulin N.A. *Algoritmy stabilizatsii dlya avtomaticheskogo upravleniya traektornym dvizheniem kvadrokoptera* / K. Gen, N.A. Chulin // *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*. – 2015. – №5.
8. Yushchenko, A.S. *Sistema upravleniya kvadrokoptrom na osnove adaptivnoy neyronnoy seti* / A.S. Yushchenko, K.R. Lebedev, Kh. Zabikhafar // *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*. – 2017. – №7.
9. Kalugin, A.I. *Optimizatsionnyy eksperiment v srede AnyLogic* / A.I. Kalugin // *Nauka i shkola*. – 2015. – №4.
10. Fedotova, V.S. *Tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya v sisteme AnyLogic* / V.S. Fedotova // *Tsarskosel'skie chteniya*. – 2013. – №XVII.
11. Popov, A.N. *Algoritm ekspluatatsionnoy nadezhnosti bol'shoy morskoy sistemy svyazi i identifikatsii sudov beregovymi tsentrami v kontseptsii razvitiya e-Navigatsii* / A.N. Popov, D.G. Chernoglazov, A. Yu. Tatarov // *Transportnoe delo Rossii*. 2019. № 1. S. 171-174.
12. Astrein, V.V. *Metodologicheskie osnovy raspredelennoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya bezopasnost'yu sudovozhdeniya* / V.V. Astrein, S.I. Kondrat'ev, A.L. Boran-Keshish'yan // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. – 2020. – № 3 (96). – S. 59-64.

УДК 004.942

DOI: 10.34046/aumsuomt99/22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ SIMINTECH

*С.О. Малахов, кандидат экономических наук, доцент
Ф.Ф. Оленко, преподаватель Т*

В данной статье рассматриваются результаты моделирования системы управления полетом беспилотного летательного аппарата (БПЛА) типа октокоптер в среде динамического моделирования SimInTech, куда была экспортирована разработанная математическая модель, а также предложена система управления на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора. При этом имитационное моделирование системы управления октокоптером завершилось экспортом системы управления, разработанной в среде Simulink. Описанный подход к моделированию системы управления позволяет воспроизвести динамику полета реального физического объекта и произвести оценку системы управления коптером. Моделирование эффектов прецессии в статье не рассматривается, также принимается, что и реактивный момент каждой винтомоторной группы (ВМГ) равен нулю, т.е. каждая ВМГ имеет два двигателя и винта, которые вращаются с одинаковой скоростью в противоположные стороны. В статью также не включен вопрос моделирования отказов оборудования, и предполагается, что объект находится только в воздухе, т.е. находится в режиме полета по умолчанию. В приведенной модели не были реализованы аварийные ситуации, режимы посадки и взлета коптера, захват им груза и разгрузка, а также выходят за рамки статьи вопросы подробного моделирования датчиков, фильтрации сигналов и шумов, изгиб рамы коптера и/или винтов, работа на предельных нагрузках, написание драйверов к той или иной аппаратуре. Техническим результатом применения алгоритма является конструирование и параметрическая реализация модели динамики объекта в общем виде и в объеме, достаточном для проектирования полетного контроллера и наземного пульта управления коптером.

Ключевые слова. Коптер; беспилотный летательный аппарат; программно-аппаратный комплекс; математическое моделирование.

MODELING THE DYNAMICS OF THE FLIGHT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN THE DYNAMIC SIMULATION ENVIRONMENT SIMINTECH

S.O. Malakhov, F.F. Olenko

This article discusses the results of modeling the field control system of an unmanned aerial vehicle (UAV) type of the octo-copter in the Simintech dynamic simulation environment, where the developed mathematical model was exported, and the control system based on proportional and integral-differentiating (PID) of the regulator was properly. Simulation of the Octo-copter control system was completed by exporting the control system developed in the Simulink environment. The described approach to modeling the control system allows you to evaluate the Capter Management System and reproduce the dynamics of the real physical object. At the