

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БПЛА ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

Иванов Егор Владимирович
Магистр 2 курса кафедры СМ7
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация. Целью работы являлась разработка системы управления группой беспилотников, совместно поднимающих груз. Тема имеет практическое применение в различных областях общественной жизни (спасательные, военные операции, строительство и т.п.). Создание такой системы позволяет решить задачу оптимального использования ресурсов, так как система становится масштабируемой, крупные и дорогие беспилотники заменяются небольшими дронами, количество которых может изменяться в зависимости от поставленной задачи.

Annotation. The aim of the work was to develop a control system for a group of drones, jointly lifting the load. The topic has practical application in various areas of public life (rescue, military operations, construction, etc.). The creation of such a system allows solving the problem of optimal use of resources, since the system becomes scalable, large and expensive drones are replaced by small drones, the number of which may vary depending on the task at hand.

Ключевые слова. Беспилотный летательный аппарат, система управления инвариантная к нагрузке, тросовая система, демпфирование колебаний полезной нагрузки.

Keywords. Unmanned aerial vehicle, load-invariant control system, cable system, damping of load swing oscillations.

Введение

В современном мире роль БПЛА довольно высока, и они находят свое применение в различных сферах общественной жизни. Их развитие идет быстрыми темпами. За последние несколько лет рынок БПЛА значительно вырос, любой человек может приобрести небольшой дрон, который способен выполнять широкий спектр задач. Быстрое развитие открывает новые горизонты использования этого вида техники. Отметим основные плюсы использования БПЛА:

езопасность человека, замена специалиста в опасных областях и ситуациях;

изкая стоимость, по сравнению с большими летательными средствами, управляемыми изнутри пилотами;

ыстрота развертывания комплекса;

Минусы:

отребность в АКБ с высокой удельной плотностью энергии;

роблема ориентированности на местности с неизвестным рельефом;

пасность при падении в нештатных ситуациях;

Актуальность темы заключается в том, что существуют различные задачи, с которыми грузовой одиночный БПЛА справиться не может (большая, неравномерно распределенная нагрузка, необходимо динамическое манипулирование объектом (придание формы)). К тому же, решение поставленной задачи открывает новые горизонты, развития групповых беспилотных систем, аналогов которых в мире пока не так много.

Целью работы была разработка концепта робототехнического комплекса для доставки спасательного снаряжения. Был поставлен ряд задач такие как: снятие характеристик винтомоторной силовой установки, разработка математической модели квадрокоптера, моделирование процесса подъема груза массой 60 кг с помощью тросов, прикрепленных к двум квадрокоптерам, проведение анализа работы системы и изучение способов демпфирования колебаний груза.

Разработка математической модели квадрокоптера.

При разработке системы необходимо было оперировать конкретными реальными параметрами объектов. Поэтому была выбрана область применения робототехнического комплекса. Аварийно-спасательный комплекс состоит из командного блока управления (на базе колесного автомобиля), двух квадрокоптеров, которые доставляют спасательный рукав в зону спасения, для выведения пострадавших из опасной зоны очага возгорания рисунок 1.

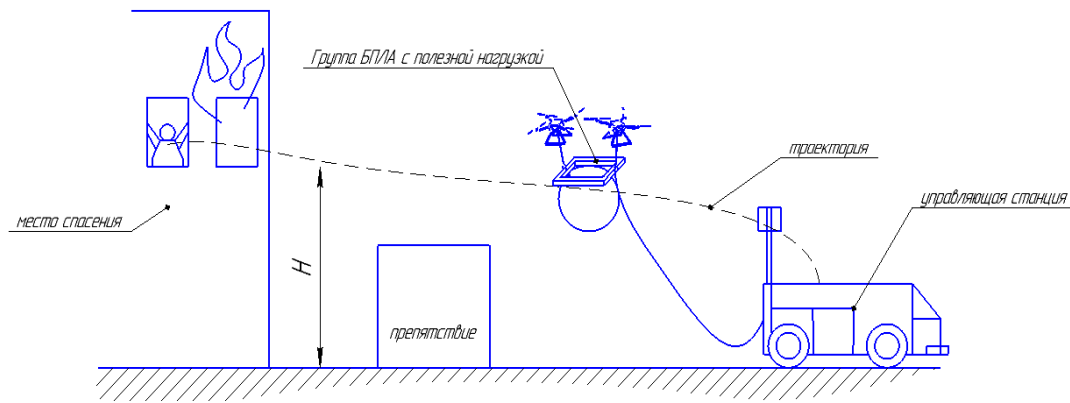


Рисунок 1 – робототехнический спасательный комплекс

Было составлено техническое задание на разработку комплекса, проведен энергетический расчет системы, выбраны компоненты и определены некоторые физические параметры оборудования. Максимальная масса спасательного снаряжения при спасении людей из горящих зданий высотой до 40 м, составила 60 кг. На основании технических требований была разработана и собрана 3D модель квадрокоптера в программной среде «КОМПАС 3D». Это позволило получить массоинерционные характеристики квадрокоптера, которые далее использовались при моделировании.

На основе энергетического анализа были подобраны электродвигатели и пропеллеры для винтомоторной силовой установки квадрокоптера [5]. Был собран испытательный стенд и проведены эксперименты по снятию силомоментных характеристик. Были получены зависимости момента тяги и реактивного момента от частоты оборотов двигателя, результаты представлены на рисунке 2.

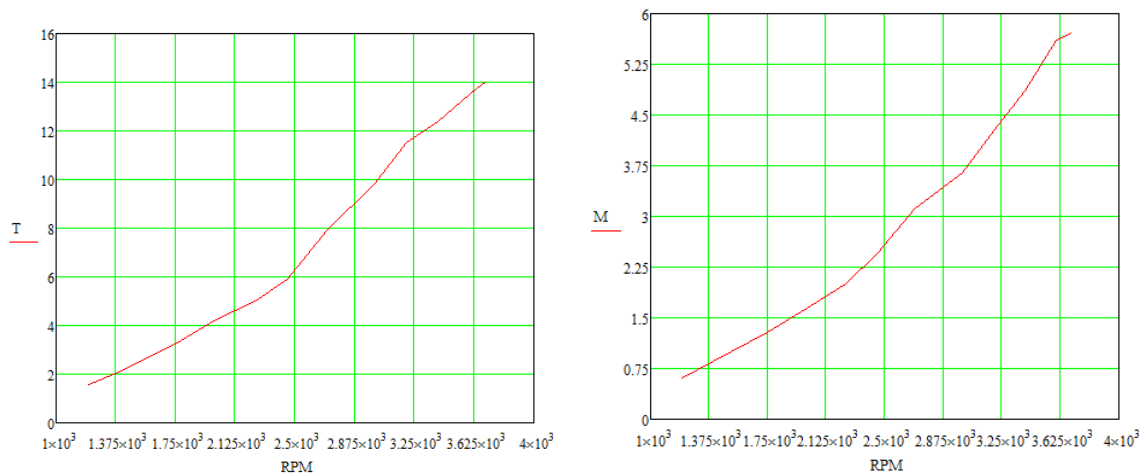


Рисунок 2 - Графики зависимостей «тяга (кг) – RPM (об/мин)», «Момент (Н*м) – RPM (об/мин)»

При вращении винта возникает сила тяги, направленная вдоль оси вращения ротора двигателя, и реактивный момент, находящийся в плоскости перпендикулярно оси вращения винта. Оба этих параметра прямо пропорционально зависят от квадрата скорости вращения винта. Аппроксимация силомоментных характеристик квадратичной зависимостью позволила определить коэффициенты сосредоточенных параметров :

$$c_T = 4,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{рад}^2}$$

$$c_Q = 3,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{рад}^2}$$

С помощью пакета «Matlab Identification toolbox» была проведена идентификация математической модели двигателя, и получена постоянная времени ($\tau = 0.3$), при представлении двигателя силовой установки аperiodическим звеном первого порядка.

Моделирование

Квадрокоптеры - это силовые модули (СМ) разрабатываемой системы, их математическая модель состоит из трех блоков: система управления (СУ), силовая установка, динамическая модель. На входы системы управления поступают желаемые и текущие координаты СМ, на выходе формируются управляющие сигналы к силовой установке (ШИМ сигнал к двигателям), сигналы преобразуются в значения силы тяги и реактивного момента, которые подаются на динамическую модель.

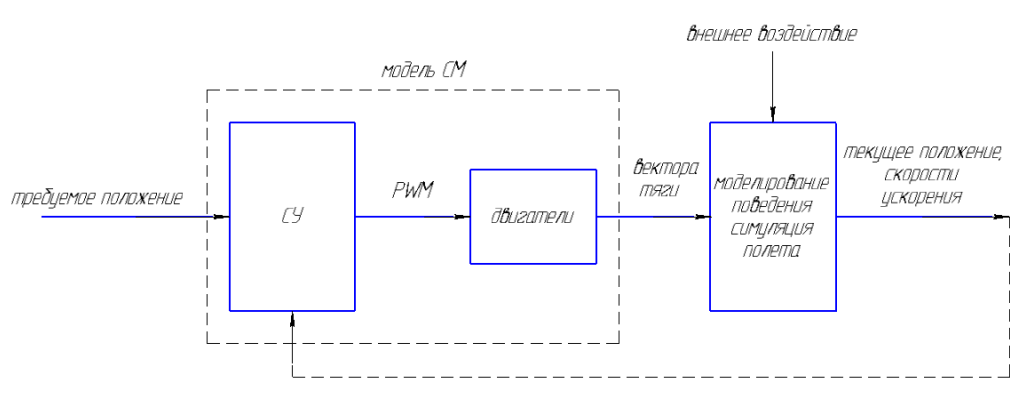


Рисунок 3 - Структурная схема силового модуля

Система управления строилась по известной классической схеме управления БПЛА, в которой производится контроль трех пространственных координат [1].

Математическая модель квадрокоптера была промоделирована в программном пакете «Matlab Simulink» [4], состоит из 5 блоков, структурная схема представлена на рисунке 4. [2]

лок задания требуемых координат

лок контроля позиции в плоскости XY

лок контроля высоты и углов

лок распределения коррекций сигналов к двигателям

лок механики квадрокоптера

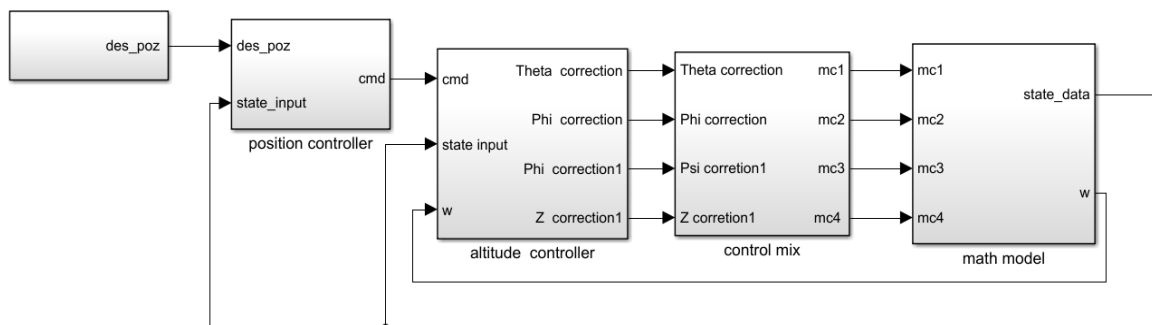


Рисунок 4 – Модель САУ квадрокоптера

Настройка контуров управления

Модель квадрокоптера имеет нелинейности в контурах управления (квадрат скорости вращения винта, тригонометрические функции), для регулировочных расчетов провели линеаризацию около нескольких рабочих точек (минимальная, средняя и максимальная частота вращения винтов), после чего получили параметры коэффициентов регуляторов. В системе управления использовались «ПИД» регуляторы по положению в плоскости X, Y, «ПД» регулятор по высоте Z. Настройка контуров производилась на модульный оптимум. Было замечено, что коэффициенты регуляторов зависели от скорости вращения винтов, ЛАЧХ линеаризованной системы в зависимости от скорости вращения винтов перемещается вдоль вертикальной оси, что влечет к изменению запасов устойчивости и быстродействия. Вследствие чего было изучено влияние адаптивных регуляторов на поведение системы, чтобы привести систему к расчетным данным около рабочих точек. Как показали эксперименты математического моделирования, выигрыш от использования адаптивного регулятора составляет 2%.

Инвариантность силового модуля к нагрузке

Для того что бы квадрокоптер мог поднимать любую нагрузку в разрешенном диапазоне и компенсировать колебания груза, необходимо подавать дополнительные сигналы управления для компенсации внешнего воздействия. Для этого расположили силомоментный датчик в схвате квадрокоптера, который измеряет три компоненты влияния полезной нагрузки: Φ_i , F_{i_c} , P_i (Сила инерции, Сила сопротивления, Вес).

Дополнительные сигналы приходящие с тензодатчика должны способствовать увеличению силы тяги квадрокоптера на требуемую величину. Место подачи сигналов (S_{Rt}) расположим в том же месте, куда приходит дополнительный сигнал (S_{Fg}), учитывающий массу квадрокоптера, то есть в сумматор перед механической частью квадрокоптера, структурная схема представлена на рисунке 5.[3]

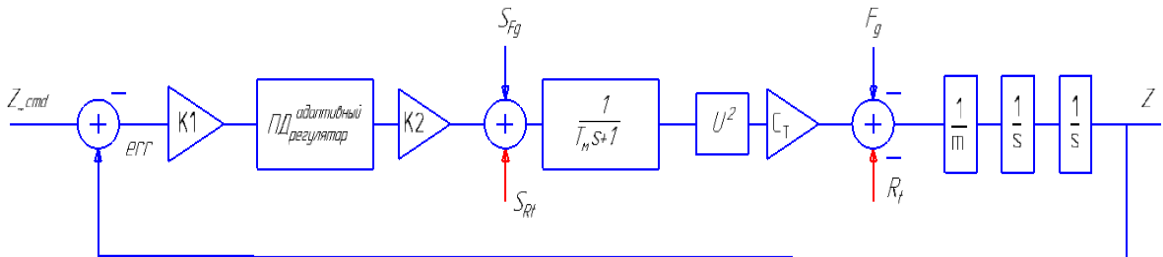


Рисунок 5 – структурная схема контура высоты с дополнительными сигналами нагрузки

Математическое моделирование совместного дождя груза

Далее рассмотрели систему состоящую из двух квадрокоптеров соединенных с общей полезной нагрузкой. Зависимости полученные для пары квадрокоптеров можно будет перенести на группу состоящую из большого количества силовых модулей.

Для изначальных расчетов математической модели мехатронной системы принимаем следующий ряд допущений:

- упругие жесткие тросы
- есткая неупругая нагрузка (в виде балки)
- квадрокоптеры двигаются в строго вдоль вертикальных линий

Уравнения механики описывающие состояние системы состоящей из двух квадрокоптеров и полезной нагрузки согласно данным допущениям:

равнение механики для полезной нагрузки по принципу Д'Аламбера, рисунок 6:

$$T_1 + T_2 + P + \Phi + F_{\text{соп}} = 0 \quad (1)$$

- $T_{1,2}$ – вектора сил натяжения тросов
- $P = Mg$ – Сила тяжести действующая на нагрузку
- $\Phi = Ma$ – Сила инерции
- $F_{\text{соп}}$ – сила сопротивления ($F_{\text{соп}} = C_{xp} V^2 S/2$)

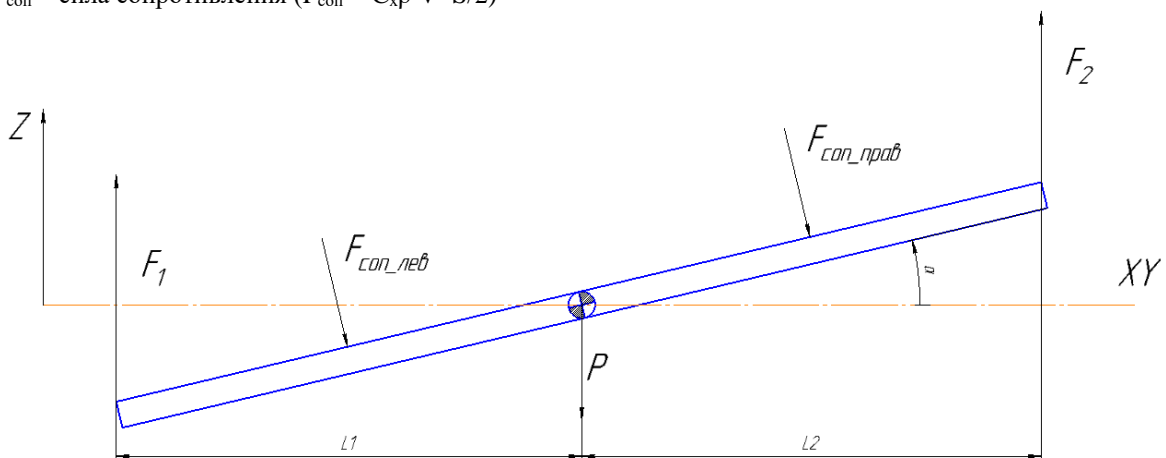


Рисунок 6 - Силы действующие на полезную нагрузку вертикальной плоскости

Уравнение моментов для полезной нагрузки:

$$J\varepsilon = -T_1 l_1 \cos \gamma + T_2 l_2 \cos \gamma + M \quad (2)$$

J – тензор инерции

ε – угловое ускорение при вращении вокруг центра масс

γ – угол поворота полезной нагрузки в вертикальной плоскости

$l_{1,2}$ – плечи сил квадрокоптеров относительно центра масс

M – момент сил сопротивления

Пренебрегая силой сопротивления, можем из полученных уравнений (1) и (2) выразить силы натяжения тросов:

$$T_1 = \frac{M(a + g)l_2 \cos \gamma - J\varepsilon}{(l_1 + l_2) \cos \gamma} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{M(a + g)l_1 \cos \gamma + J\varepsilon}{(l_1 + l_2) \cos \gamma} \quad (4)$$

Данные зависимости (3, 4) необходимы для формирования сигналов влияния полезной нагрузки на квадрокоптеры при моделировании. Обозначим, что обобщенные координаты описывающие состояние системы – это координаты квадрокоптеров по вертикальной оси: z_1, z_2 .

Приведем выражения для нахождения угла наклона нагрузки, углового ускорения ее вращения, и линейного ускорения центра масс ее перемещения:

$$\gamma = \arcsin \frac{z_1 - z_2}{L} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \ddot{\gamma} = \frac{\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2 \left(1 - \left(\frac{z_1 - z_2}{L}\right)^2\right) + \left(\frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{L}\right)^2 \left(\frac{z_1 - z_2}{L}\right)}{\left(1 - \left(\frac{z_1 - z_2}{L}\right)^2\right)^{1.5}} \quad (6)$$

$$a = \frac{\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2}{2} \quad (7)$$

На основании выведенных уравнений проводим моделирование системы в контурах управления квадрокоптера по высоте используем обратные связи о силе натяжения.

Рассмотрели переходный процесс, когда оба квадрокоптера двигаются синхронно (одинаковый управляющий сигнал). Масса груза 1 кг. Коэффициенты регуляторов не менялись, моделирование проводилось с выключенными (а) и включенными (б) обратными связями по силе натяжения тросов (рисунок 8).

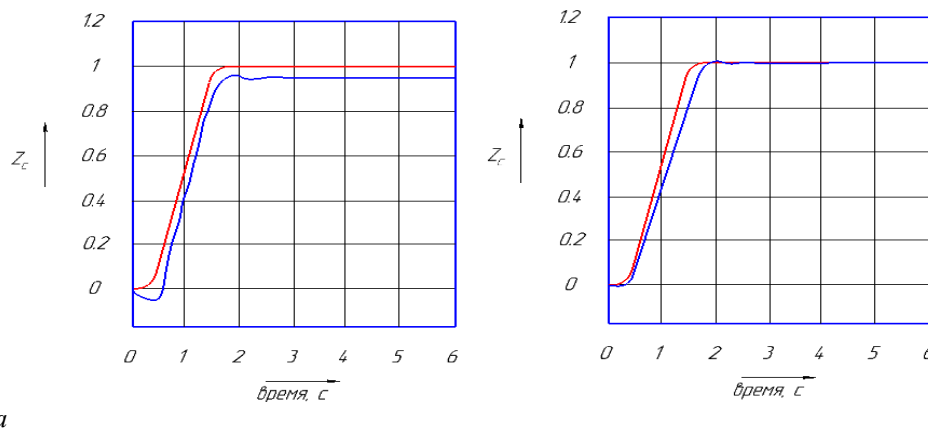


Рисунок 8 – График перемещения центра масс нагрузки вдоль вертикальной оси в сравнении с требуемым перемещением - красный график, а) без дополнительной связи о влиянии нагрузки, б) с дополнительной связью от силомоментного датчика.

Проанализировав, полученные данные было определено, что дополнительная обратная связь по внешней силе, позволяет скомпенсировать массу груза. Статическая ошибка стала равна нулю. В действительности в автоматической системе управления квадрокоптера используются ПИД регуляторы, интегральная составляющая позволяет скомпенсировать массу груза, однако это влечет к увеличению инерции, увеличивается время переходного процесса. Обратные связи по силе позволяют увеличить быстродействие. Далее рассмотрели вариант, когда масса груза увеличилась до максимального значения 60 кг, получили переходные характеристики, представленные на рисунке 9.

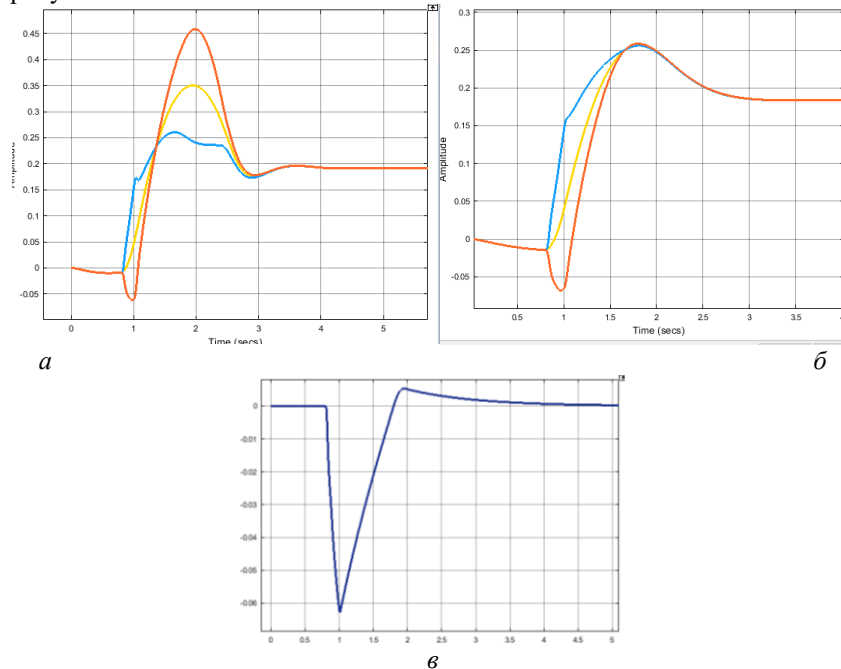
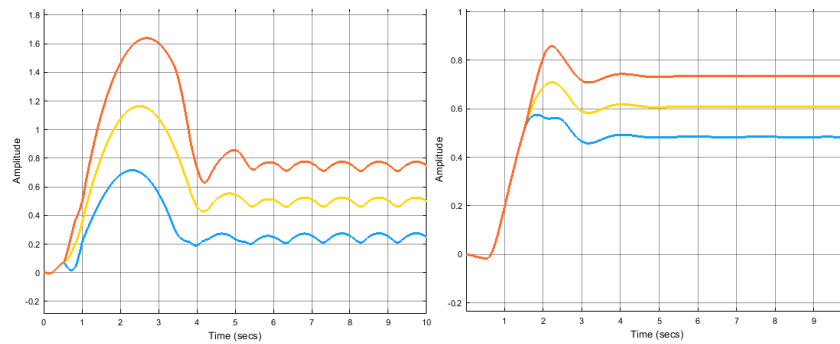


Рисунок 9 - График перемещения центра масс нагрузки в доль вертикальной оси (голубой график), когда два квадрокоптера обрабатывают одинаковый управляющий сигнал, (желтый, красный графики – положение центров масс квадрокоптеров),
 а) без корректировки коэффициентов
 б) с корректировкой коэффициентов регуляторов
 в) график изменения угла наклона нагрузки, для варианта (б)

При работе с максимальной нагрузкой, возникает большое перерегулирование (100%). Было проведено исследование влияния коэффициентов регулятора высоты. Согласно расчетам приведенным ранее, было замечено, что коэффициенты зависят от массы квадрокоптера, была учтена масса нагрузки (ее среднее значение 30 кг) и пересчитаны коэффициенты, они прямопропорциональны массе. После перенастройки, перерегулирование уменьшилось до (20%). Переходный процесс представлен на рисунке 71 (б).

Далее рассмотрели случай, когда квадрокоптеры работают по разным управляющим сигналам, груз поднимается под заданным наклоном. Моделирование проводили для груза максимальной массой 60 кг.

На графике (а) рисунка 10 видно, что присутствует большое перерегулирование и незатухающие колебания. После включения дополнительных связей о силе натяжении тросов были получены переходные характеристики, представленные на рисунке 10, из которого видно, что колебания исчезли, время переходного процесса уменьшилось.



а б

Рисунок 10 – Графики перемещения центра масс нагрузки (желтый график) и двух квадрокоптеров (красный и голубой графики) : а) система без обратных связей нагрузки б) система с дополнительными связями влияния нагрузки.

На основании полученных результатов, заключили, что квадрокоптеры с настроенными регуляторами и обратными связями по силе могут поднимать совместно груз, обеспечивать требуемое качество. Колебания и растягивание во времени переходного процесса возникает при увеличении массы нагрузки, поэтому необходимо использовать адаптивные регуляторы и обратные связи по силе, либо уменьшить быстродействие, тем самым обеспечив плавность. Рассмотренная модель имела допущения, поэтому впоследствии работу системы проверили на полноценной модели, собранной в программном пакете «Matlab Simulink Simscape». Результаты моделирования полноценной модели, подтвердили результаты моделирования упрощенной системы.

Заключение

процессе работы был проработан и конструктивно рассчитан пример возможности использования группы БПЛА в процессе тушения пожаров: поднятие спасательного рукава, для выведения пострадавших из опасной зоны очага возгорания.

акой робототехнический комплекс имеет ряд преимуществ:

беспечивает спасение людей из зданий высотой до 40 м

ыстрая активация комплекса

оставка спасательного снаряжения в труднодоступные для спасателей места аварии.

ходе исследовательской части работы была разработана система автоматического управления для квадрокоптера. Были проведены эксперименты по получению переходных характеристик винтовой силовой установки квадрокоптера. После чего данные были использованы в полноценной модели квадрокоптера, собранной в Matlab

Был проведен анализ работы дронов в группе (два квадрокоптера), при транспортировании полезной нагрузки. Рассмотрены варианты обеспечения стабилизации работы группы, с помощью введения обратных связей о влиянии нагрузки. Было проведено математическое моделирование упрощенной системы подъема груза, была подтверждена эффективность такого метода. После чего смоделирована работа полноценной системы в пакете «Matlab Simulink Simscape», которая обеспечивала работу системы согласно техническому заданию. Дальнейшее развитие работы требует создания опытного образца робототехнического комплекса для проверки, разработанных алгоритмов.

Список литературы

1. Teppo Luukkonen_Espoo Modeling and control of qadrocopter // - 2011. - №August 22.
 2. Daniel Mellinger, Michael Shomin, and Vijay Kumar Control of Quadrotors for Robust Perching and Landing // GRASP Lab, University of Pennsylvania. - 2010.
- .С. Блейз, А.В. Зимин, Е.С. Иванов и др Теория и проектирование следящих приводов. - Следящие приводы: В 3 т. 2-е изд., доп. И перераб./Под ред. Б.К. Чемоданова. изд. - М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1999. - 904 с.
- .В. Поршнев MATLAB 7. Основы работы и программирования.. - Учебник изд. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. - 320 с.

t
t
p
n
e
v
l
e
r
c
o
m
u