

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ PID РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОШИВОК БПЛА

В статье рассматривается практическая возможность настройки параметров PID регулятора для семейства прошивок cleanflight беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) роторного типа и с неподвижным крылом во время полета. Показано, что для этого необходимо использование аппаратуры радиоуправления с минимальным количеством каналов равным восьми. Разработан беспилотный летательный аппарат (БПЛА) на базе полетного контроллера OMNIBUSF4V3 с встроенным гироскопом и акселерометром, барометром/высотометром BMP280. Разработана схема подключения 3-х осевого компаса HMC5883L по шине I2C и GPS приемника ublox NEO-6M к порту контроллера UART6. В качестве прошивки использована INAV ver.2.2.1, поддерживающая навигационные функции. Спроектированный квадрокоптер (БПЛА) способен выполнять следующие полетные режимы: ANGLE - автоматическое выравнивание крена и тангажа с контролем угла горизонта, заданное значение которого не может превышать, чем достигается устойчивый полет. Здесь задействованы гироскоп и акселерометр для удержания горизонта. NAV ALTHOLD - удержание высоты. Здесь использован барометр, который способствует удержанию высоты по давлению воздуха. NAV POSHOLD - выполняется удержание позиции. Использует GPS. NAV RTH (Return To Home) - возврат домой, в точку взлета. NAV WP - полет по заданной траектории, которая аппроксимирована путевыми точками. В этом случае в конфигураторе накладываются на выбранную карту местности путевые точки с такими параметрами, как высота, скорость ее пролета.

Для малых оборотов моторов показана возможность использования режима AIR MODE для увеличения эффективности работы PID регулятора. Показана возможность использования программы STM32 Flash loader demonstrator в качестве программатора для прошивки полетного контроллера OMNIBUSF4V3 любой прошивкой семейства Cleanflight. Установлено, что для настройки параметров P, I и D возможно использование трехпозиционного переключателя на одном из каналов управления и переменного резистора на другом канале. Если отградуировать резистор на три положения можно выполнить регулировку трех параметров, а на пять положений - 5 параметров. Рассмотрен вопрос настройки устойчивости полета коптера. При резком увеличении дроссельной заслонки возможен завал коптера в одну из сторон и его падение. Установлено, что для предотвращения этого необходимо использование одинаково подобранных ESC регуляторов, моторов и правильная настройка PID параметров в частности по YAW.

Ключевые слова: OMNIBUSF4V3, PID-регулятор, INAV, GPS приемник, AIR MODE, STM32F4, HMC5883L, NEO6MV2, MPU6000.

Введение и постановка задачи. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) роторного типа (квадрокоптеры, гексакоптеры и др.), с неподвижным крылом (самолеты, летающие крылья) для обеспечения удержания горизонтального полета используют классические PID регуляторы [1-4]. Для управления полетом перечисленных выше БПЛА наиболее часто используют полетные контроллеры на базе микроконтроллеров STM32F4, STM32F7 с прошивками betaflight, cleanflight, INAV [1,5,6]. Первые две прошивки используются в основном на небольших квадрокоптерах, очень динамичных и развивающих высокие скорости. Они не используют навигационное оборудование, такие как компас, барометр, GPS приемник для удержания позиции, возврата в точку старта и полета по точкам - заданной траектории. Прошивка INAV [1,6] используется и для больших коптеров, летающих крыльев, на которых установлено навигационное оборудование. В основном эта прошивка применяется для дальних полетов с использованием курсовой камеры (полет по FPV). Такие полеты опасны тем, что при потере связи с видеопередатчиком теряется информация о положении БПЛА и он

улетает в неопределенное местоположение. Для этого в прошивке INAV существует возможность использование навигационной аппаратуры, которая позволяет по GPS приемнику, магнитометру, барометру в случае потери радиосвязи вернуться в положение старта или на расстояние, доступное для радиосвязи. Однако для устойчивого полета БПЛА, особенно в ветреную погоду, на высоких скоростях с резкими изменениями траектории (динамичные маневры), должен быть идеально настроен PID [7-9] регулятор - подобраны его три параметра - P, I, D. В настоящее время не существует аналитического решения этой задачи для разной геометрии, веса БПЛА. Эта задача решается опытным путем в полёте для разных типов, размеров, веса, установленного оборудования БПЛА. В работе рассматривается, как это реализовано с помощью аппаратуры радио управления для перечисленных типов прошивок так как они имеют аналогичный PID регулятор. Перед настройкой регулятора рассматривается особенность построения четырёхмоторного БПЛА (квадрокоптера) на базе полетного контроллера OMNIBUSF4V3 [10] с прошивкой INAV Ver.2.2.1 [5], которая является последней на момент написания работы.

Анализ последних исследований и публикации. В настоящее время в периодической литературе мало представлено работ по построению, программированию и практическому исследованию поведения БПЛА для разных его геометрических параметров, используемых полетных контроллеров, прошивок, навигационных датчиков [1-3,9]. Так разное программное обеспечение полетных контроллеров (прошивки) [1-12] очень сильно влияет на устойчивость, стабильность, продолжительность полета. Навигационные датчики совместно с программным обеспечением позволяют придерживаться более или менее точного полета по заданным траекториям. Используемые математические модели фильтрации данных с датчиков (фильтр Кальмана, комплементарный фильтр и др.) оказывают сильное влияние на БПЛА во время полета и устойчивого маневрирования. Большое значение имеет подбор параметров для выбранной модели стабилизации и параметров для усиления классических параметров математических моделей, например, TPA, AIRMODE, Anti-Gravity [1,6] и др. Подбор программного обеспечения, полетных контроллеров, датчиков, геометрии БПЛА для максимально устойчивого полета БПЛА возможно лишь при проведении летных испытаний. Представленная работа посвящена практическому анализу представленным здесь техническим средствам и программному обеспечению.

Изложение основного материала работы. INAV является ответвлением известного проекта Cleanflight [1, 13] с акцентом на функции GPS для самолетов и мультироторных моделей. INAV активно развивается и в настоящее время - поддерживает режимы RTH (Return To Home) с предопределенной высотой набора высоты, удержание позиции, полета по путевым точкам, режим «Следуй за мной» (Follow-Me) и другие.

Особенностью прошивки INAV является возможность динамически регулировать усиление PID, поэтому высокий дроссель (ускоренный полет вперед или быстрый набор высоты) не вызывает высокочастотных колебаний квадрокоптера, характерных для высоких значений составляющей P в PID регуляторе. Для этого вводится параметр TPA [Throttle PID Attenuation]. TPA обеспечивает уменьшение значения PID по отношению к полному дросселю [1]. Он используется для гашения значений PID при достижении полного газа. Численно TPA равен проценту гашения, которое будет иметь место при полном открытии дроссельной заслонки. TPA Breakpoint – точка на кривой газа, с которой начнет применяться TPA. Ниже этой точки TPA не используется. Например, если возникают колебания, начинающиеся с 3/4 дросселя, необходимо установить TPA Breakpoint равное 1750 или ниже (предполагается, что диапазон изменения дросселя составляет 1000-2000), а затем медленно необходимо увеличить TPA, пока колебания квадрокоптера не исчезнут. На рис. 1 показан пример мультироторной кривой TPA.

Для динамической регуляции усиления PID очень важно установить режим AIRMODE. В стандартном режиме уменьшения дроссельной заслонки, когда рассчитываются крен, шаг и рыскание, все двигатели будут уменьшать обороты одинаково. При развороте некоторые двигатели могут даже отключаться. Это приводит к уменьшению усиления PID регулятора.

Поэтому при резком снижении квадрокoptера, резких поворотов из-за уменьшения воздействия PID регулятора на стабилизацию полета квадрокoptер падает. Airmode обеспечит полную коррекцию PID во время нулевого дросселя и дает возможность плавного полета и выполнения высшего пилотажа. Для построения опытного квадрокoptера использовались следующие компоненты:

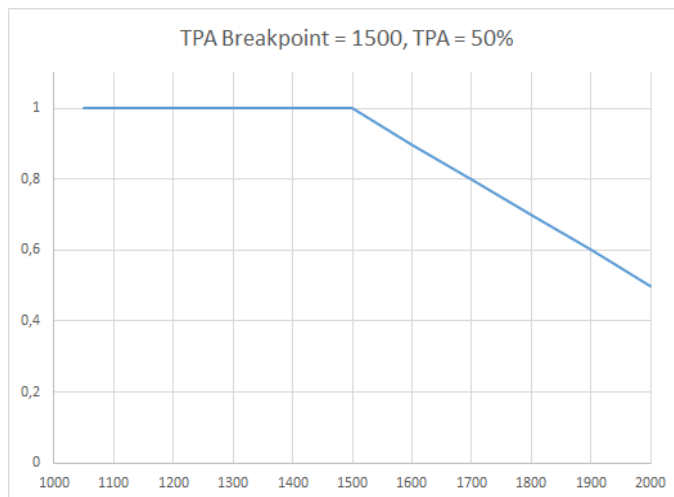


Рисунок 1 – Пример мультиторторной кривой ТРА

1. Рама размером 380мм
2. Моторы A2212/1000 с ESC регуляторами на 30А [14]
3. Пропеллеры 10х45 дюймов
4. Полетный контроллер OMNIBUSF4V3[9] на базе микроконтроллера STM32F405 [7] LQFP64 (168Mhz, 1M Flash, 192kB SRAM) с встроенным гироскопом, акселерометром MPU6000 [11] и барометром BMP280
5. Компас HMC5883L [2] подключенный к шине I2C
6. GPS приемник NEO6М [2]

Для питания моторов и электроники установлена батарея lipo 3S1P 1800mAh. Она обеспечивала полет в течении 11-13минут. Квадрокoptер должен уметь удерживать высоту (барометр), позицию (GPS приемник) и возвращаться домой и летать по заданной траектории (до 60 полетных точек).

На рис. 2 представлен полетный контроллер OMNIBUSF4V3 [11] с обозначением его основных выводов для подключения к датчикам, моторам, приемнику и видеопередатчику.

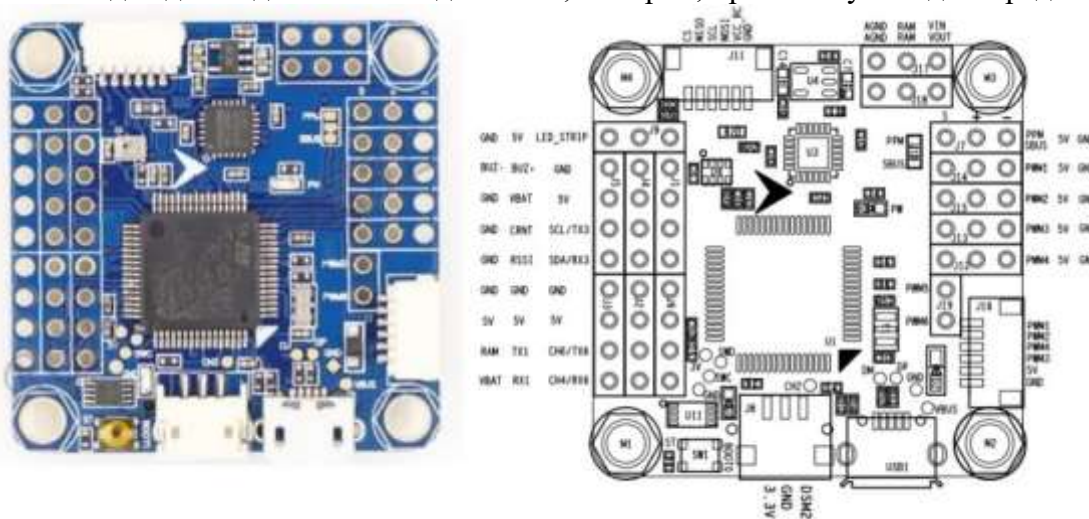


Рисунок 2 – Полетный контроллер OMNIBUSF4V3

Для решения задачи требуется прошивка контроллера, которая копируется с сайта https://github.com/iNavFlight/inav/releases/download/2.2.1/inav_2.2.1_OMNIBUSF4V3.hex, и конфигуратор `inav ver. 2.2.1` -: https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/download/2.2.1/INAV-Configurator_win32_2.2.1.zip. Для прошивки OMNIBUSF4V3 использовалась программа STM32 Flash loader demonstrator [4] с сайта <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html> и конвертер USB to TTL на базе микросхемы CH340. Процедура прошивки описана в работе [1] для полетного контроллера cc3d, которая аналогична прошивке OMNIBUSF4V3. Подключение конвертера выполняется к выводам TX1, RX1 контроллера OMNIBUSF4V3.

Подключение к OMNIBUSF4V3 компаса, GPS приемника, приемника управления по PPW, моторов показано на рис. 3. Компас должен находиться над плоскостью вращения пропеллеров на высоте не менее 15см для уменьшения помех при работе моторов. Подключение приемника радиуправления возможно и по шине SBUS, однако это приведет к использованию дополнительного порта UART у микроконтроллера. Важно то, что необходима установка переключки при выборе PPW или SBUS. Эта переключка расположена в правой верхней части контроллера.

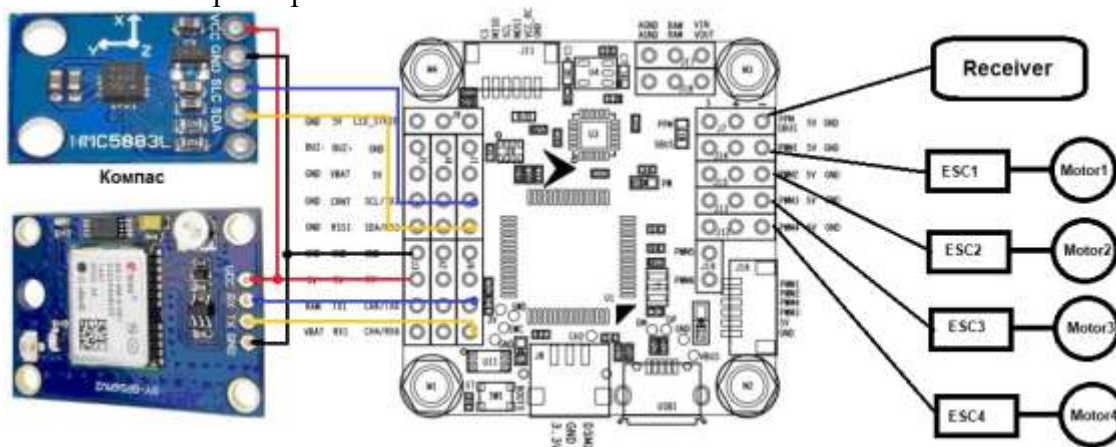


Рисунок 3 – Схема подключения к полетному контроллеру

После подключения согласно рис. 3 необходимо запустить конфигуратор INAV и последовательно заходить во вкладки и выполнять настройки параметров. Во вкладке Ports на строке UART6 в позиции Sensors устанавливается GPS со скоростью 38400. В вкладке Mixer выбирается Quad X и нажимается кнопка Load and apply. После выхода с каждой вкладки выполняется сохранение (кнопка save). Во вкладке Configuration в качестве Sensors должны быть установлены MPU6000 (Accelerometr), HMC5883 (Magnetometer), BMP280 (Barometer). В разделе Board and Sensor Alignment - устанавливается MAG alignment - CW 90. Это соответствует расположению компаса, повернутого на 90 градусов. Receiver Mode - PPM RX input - режим работы приемника. В разделе GPS включается GPS и устанавливается протокол UBLOX. В разделе ESC/Motor Features включается Enable motor and servo output. Устанавливается протокол, например, ONESHOT125 [15]. Во вкладке PID tuning предварительно устанавливаются параметра PID регулятора, как на рис. 4. Их настройка рассмотрена ниже.

Name	Proportional	Integral	Derivative	FeedForward
Basic/Acro				
Roll	47	13	39	0
Pitch	47	13	39	0
Yaw	120	60	0	0

Рисунок 4 – Параметры PID регулятора

Во вкладке Motors после включения выключателя "I understand the risks, propellers are removed - Enable motor control" необходимо проконтролировать, в какую сторону вращаются моторы в соответствии с рисунком. Если мотор вращается не в ту сторону, меняется подключение двух из трех проводов мотора к ESC регулятору. Во вкладке Receiver контролируется работа каналов приемника. Перемещение стиков и включение и выключение активных тумблеров на пульте управления должно отображаться во вкладке адекватно. Во вкладке Modes устанавливаются полетные режимы квадрокоптера в соответствии с работой [1]. В рассматриваемой версии INAV возможна настройка полетной миссии - Mission Control (полет по заданной траектории с указанием путевых точек, рис. 5). Здесь производится выбор участка карты. Должен быть доступ к Интернет. Указываются нажатием клавишей мышки путевые точки. Каждая путевая точка после второго нажатия на нее мышкой высвечивает свои координаты с параметрами высоты пролета над ней и скоростью. Эти значения необходимо отредактировать. Если необходимо вернуться в точку старта с автоматической посадкой - ставят галочку на RTN at the end of the mission и на Landing. Сформированный маршрут записывается командами Save mission to FC и Save Eeprom mission. Полет по точкам может быть выполнен, если во вкладке Modes будет установлен переключатель на пульте радиоуправления в полетный режим NAV WP.

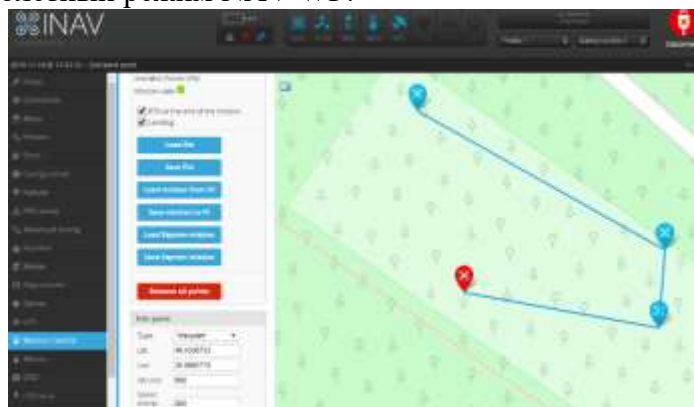


Рисунок 5 – Формирование полетной миссии по путевым точкам

Во вкладке Calibration необходимо выполнить калибровку Accelerometra и Compass. Схема калибровка Accelerometra показана на рисунке вкладки. Для этого предварительно нажимается кнопка Calibrate Accelerometr. При калибровке компаса квадрокоптер необходимо вращать по 6-ти осям. На эту процедуру выделяется 30 секунд. Калибровка в поле выполняется перемещением стиков на пульте управления по правилу: Левый стик вверх и вправо, правый стик вниз в течении 2-3секунд. После это коптер вращается по 6-и осям.

При полете коптера в автоматическом режиме настраиваются параметры во вкладке Advanced tuning. Обычно настройка ведется в двух основных разделах. Это Multirotor Navigation Settings и RTN and Landing Settings.

Раздел Multirotor Navigation Settings.

User Control Mode:

Altitude - В этом режиме коптер в меньшей степени отслеживает свое положение по спутникам. Например, включается полетный режим NAV POSHOLD - удержание позиции. Если стиком пульта дать перемещение вперед, координаты со спутника не будут восприниматься коптером. Но в случае возврата стика в нейтральное положение, коптер определит координаты со спутника и вернется в положение, когда стик занял нейтральную позицию. При большой скорости возможно перелетание позиции и коптер будет возвращаться обратно в точку нейтрального положения стика. Коптер в этом режиме более динамичен, чем в режиме Cruise и используется для малых коптеров.

Cruise - Здесь при перемещении стиков с нейтральной позиции коптер при полете постоянно контролирует свои координаты и в случае возвращения стиков в нейтральную

позицию коптер сразу останавливается. При этом режиме коптер мало динамичен, подходит для больших коптеров.

Max. navigatoin speed - это максимальная скорость в режиме навигации в см/с (установлен режим NAV POSHOLD).

Max. CRUISE speed - максимальная скорость в режиме круиза в см/с.

Max. navigator climb rate - максимальная скорость подъема в режиме навигации в см/с.

Max. ALTHOLD climb rate - максимальная скорость подъема в режиме удержания высоты в см/с.

Multicopter max. banking angle [degrees] - максимальный угол наклона коптера в градусах в режиме навигации.

Use mid. throttle for ALTHOLD - Если включен, режим удержания высоты установлен, когда стик газа находится в среднем положении.

Hover throttle - В этом окне указывается число, пропорциональное частоте вращения моторов при среднем стике газа. Если в среднем стике газа на пульте установить режим удержания высота и коптер будет резко набирать высоту или снижаться, необходимо точнее установить это число.

Раздел RTH and Landing Settings.

RTH altitude mode:

Current - возврат домой (в точку старта) выполняется на той же высоте на которой была потеряна связь с пультом управления или дана команда возврата.

Extra - при возврате коптер с текущей высоты поднимется на высоту, указанную в параметре RTH altitude.

Fixed - при возврате, если коптер имеет высоту срабатывания возврата домой ниже RTH altitude, то он поднимается на высоту возврата и далее на ней летит домой. Если коптер был выше высоты возврата, то по всей обратной траектории он медленно опускается до высоты возврата домой.

Max - коптер возвращается в точку старта на максимальной высоте, которую он зафиксировал во время полета. В этом случае, если коптер перелетел гору, а потом снижался, он при обратном возврате не столкнется с горой.

At least - возвращается в точку старта на высоте не меньше той, что указана в параметре RTH altitude. Если высота коптера была меньше RTH altitude при срабатывании RTH, то он поднимается на высоту возврата. Если больше, то возвращается на этой же высоте.

RTH altitude - высота возврата домой в см.

Climb before RTH - сначала подняться до высоты RTH altitude, потом вернуться в точку старта.

Climb regardless of positions sensors health - подняться независимо от датчика, который потерял связь со спутниками. Если связь не восстановиться на высоте, коптер приземлится в этом месте.

Tail first - возврат домой задом без разворота.

Land after RTH - Always - всегда выполнять посадку в точке старта, Never - не выполнять посадку в точку старта, Only failsafe - выполнять посадку в случае потери связи с передатчиком.

Landing vertical speed - вертикальная скорость посадки.

Min. vertical landing speed at altitude - высота, на которой вертикальная скорость посадки замедляется.

Vertical landing speed slowdown at altitude - высота, начиная с которой коптер начинает притормаживать вертикальную скорость посадки.

Min. RTH distance - минимальное расстояние, начиная с которого коптер будет выполнять процедуру возврата домой. Если расстояние меньше и связь с аппаратурой управления нарушиться, коптер выполнит посадку в месте обрыва связи.

Рассмотрим возможности полетного контроллера и прошивки INAV по настройке PID регулятора. Известно, что PID регулятор (Пропорционально интегрально дифференцирующий

регулятор) это управляющий цикл с обратной связью, который очень часто используется во всевозможных управляющих системах. PID регулятор вычисляет значение «ошибки» как разницу между измеренным значением переменной и ее желаемым значением. Он пытается минимизировать ошибку воздействуя на управляемые входы.

PID регулятор берет данные, измеренные сенсорами полетного контроллера (гироскопы, акселерометры) и сравнивает их с ожидаемым значениями, чтобы изменить скорость моторов для компенсации любых отклонений и удержания баланса. Алгоритм вычислений в PID регуляторе включает в себя 3 постоянных параметра, пропорциональное, интегральное и дифференцирующее значения, обозначаемые P, I и D. Эвристически эти значения могут быть интерпретированы как значения во времени: P зависит от текущей ошибки, I – от накопившихся прошлых ошибок, D – это предсказание будущих ошибок, на основании скорости изменения. В зависимости от полетного контроллера PID регуляторы будут связаны с различными полетными режимами.

P – это основное значение, которое определяет стабильность. Например, если I и D будут равными 0, самолет будет удерживать горизонтальное положение. Поэтому значение P настраивается до значений I и D.

Чем больше значение P, тем резче оно пытается стабилизировать коптер. Но если P слишком большое, то коптер становится слишком чувствительным и слишком резко пытается корректировать свое положение, проскакивая требуемое положение (чрезмерно резкая и быстрая реакция), в этом случае возникнут колебания с большой частотой. Параметр P увеличивают до тех порка не появятся высокочастотные колебания, звуки которых легко можно различить. Далее P уменьшают примерно на 30%.

D – это противоположность P. При резком отклонении стиков по крену и тангажу при малых D коптер начинает раскачиваться, что приводит к его переворачиванию. В этом случае повышают D так, чтобы при резком отклонении стиков и возврате их в нейтральное положение коптер возвращался в горизонтальное состояние без колебаний. Значение I увеличивают до тех пор, пока не появятся низкочастотные колебания коптера. После этого I уменьшают до полного прекращения колебаний. Значение I уменьшает раскачку коптера во время быстрого снижения.

Рассмотрим настройки INAV для изменения параметров P, I и D во время полета. Для этого используется вкладка Adjustments. На пульте управления необходимо выбрать два канала - это трехпозиционный переключатель и "крутилка" - канал, связанный с переменным резистором, который может плавно изменять значения импульсов от 1000 до 2000. Изменение значений параметров выполняется с помощью трехпозиционного переключателя. Среднее положение соответствует состоянию, когда параметр не изменяется. Верхнее положение - уменьшению параметра. Нижнее - увеличению. К полетному контроллеру обязательно должен быть подключен зуммер. При уменьшении параметра на одну единицу он дает однократный сигнал с периодом примерно 0.5сек. При увеличении - двойной сигнал. Например, пять сигналов, - параметр от исходного значения уменьшился на 5 единиц и т.д. Для выбора параметра используется канал с резистором. Если поворот резистора разметить на 3 одинаковых части, то можно менять три параметра, установив резисторы в определенное положение. Рис. 6 вкладки иллюстрирует сказанное выше.



Рисунок 6 – Иллюстрация работы с вкладкой Adjustments

Канал CH6 использует переменный резистор. На канале CH5 установлен трехпозиционный переключатель. Если ручка резистора (CH6) находится в левом положении, то трехпозиционный переключатель изменяет параметр P по Pitch и Roll одновременно. При среднем положении ручки резистора одновременно меняются значения параметра I также по Pitch и Roll одновременно. Одновременное изменение возможно, так как коптер симметричный с центром тяжести в центре. Так будут изменяться параметры, представленные в таблице на рис. 4. Чтобы увидеть эти изменения необходимо нажать на кнопку refresh в вкладке PID tuning это в случае, если компьютер подключен к полетному контроллеру. При нажатии на кнопку save новые параметры будут сохранены. Во время полета для сохранения измененных параметров PID необходимо на пульте управления опустить вниз и развести в разные стороны стики пульта управления. Сигнал зуммера укажет, что значения PID регулятора записаны в EEPROM память контроллера. Для такой регулировки параметров необходимо иметь 8-ми каналную систему управления. Аналогично можно менять многие параметры полетного контроллера, которые можно выбрать в колонке then apply вкладки Adjustments. Чем больше каналов имеет система управления, тем большее количество параметров регулируется в тестовых полетах по настройке любого БПЛА.

При установке навигационного оборудования на коптер, арминг коптера можно выполнить только в случае подключения к такому количеству спутников, которые указаны во вкладке Advanced tuning в параметре Min. GPS satellites for a valid fix, например, 6 спутников. Для разрешения арминга без спутников используется команда `set nav_extra_armining_safety = OFF`, которую вводят в вкладке CLI с последующим вводом команды save. На рис. 7 представлено фото экспериментального БПЛА со снятыми пропеллерами. Компас вынесен за пределы корпуса GPS приемника для уменьшения сбоев его работы и зависания.



Рисунок 7 – фото экспериментального БПЛА со снятыми пропеллерами

Выводы. В статье показаны особенности определения параметров PID регулятора для прошивки беспилотного летательного аппарата, а именно:

1. Показана возможность использования прошивок семейства Cleanflight на примере INAV для изменения параметров PID регулятора во время полета с помощью пульта управления.

2. Для малых оборотов моторов показана возможность использования режима AIR MODE для увеличения эффективности работы PID регулятора.

3. Исследована возможность использования прошивки INAV с полетным контроллером OMNIBUSF4V3 начиная с версии 1.9.2 для полета по заданной траектории, которую можно сформировать максимум из 60 путевых точек.

4. Рассмотрено подключение к полетному контроллеру магнитометра, GPS приемника, моторов, радиоприемника системы управления для построения бюджетного (до \$100) полностью автоматического квадрокоптера для выполнения фото съемок местности по радиусу до 10км с литий ионными элементами емкостью 6000мАч.

5. Показана возможность использования программы STM32 Flash loader demonstrator в качестве программатора для прошивки полетного контроллера OMNIBUSF4V3 любой прошивкой семейства Cleanflight.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Мясичев А.А. Возможности полетного контроллера cc3d с прошивкой inav. / Вісник ХНУ. Технічні науки. -Хмельницький: ХНУ, 2019. - №1. - С. 129-136.

2. Мясичев А.А. Использование платы ROBOTDYN MEGA2560 PRO для построения полетного контроллера гексакоптера / А.А. Мясичев // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький: ХНУ, 2018. – № 3. – С. 171–179.

3. В. Чигінь, П. Михайлишин. Експериментальний безпілотний авіаційний комплекс для фотозахоплення / Вісник ХНУ. Технічні науки. -Хмельницький: ХНУ, 2019. - №2. -С. 202-206.

4. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access: <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>.

5. INAV Configurator 2.2.1. [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/2.2.1>.

6. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access: <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>.

7. F1, F3, F4 AND F7 FLIGHT CONTROLLER DIFFERENCES EXPLAINED. [Electronic resource]. – 2017. - Mode of access: <https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller>

8. Карпов В.Э. ПИД-управление в нестрогом изложении. [Electronic resource]. – Москва, 2012. – Mode of access: http://robofob.ru/materials/articles/pages/Karpov_mobline1.pdf

9. QUADCOPTER PID EXPLAINED. [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://oscarliang.com/quadcopter-pid-explained-tuning/>

10.OMNIBUS F4V3. [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access: http://nic.vajn.icu/PDF/radio-controlled/OMNIBUS_F4_V3.pdf

11.Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md>.

12.Open-Source flight controller software for modern flight boards. [Electronic resource]. -2018. - Mode of access: <http://cleanflight.com/>.

13.Gyroscopes and Accelerometers on a Chip. [Electronic resource]. – 2013. – Mode of access: <http://www.geekmomprojects.com/gyroscopes-and-accelerometers-on-a-chip/>

14.Мясичев А.А. Программирование esc регуляторов SIMONK-30A И EMAX SIMON-12A через ARDUINO и полетный контроллер / Вісник ХНУ. Технічні науки. - Хмельницький: ХНУ, 2019. - №2.- С. 228-237.

15.Мясичев А.А. Построение БПЛА на базе полетного контроллера APM 2.6. / Вісник ХНУ. Технічні науки. -Хмельницький: ХНУ, 2016. - №5. - С. 225-230.

REFERENCES:

1. Myasishev A.A. Vozmozhnosti poletnogo kontrollera cc3d s proshivkoj inav. / Visnik HNU. Tehnichni nauki.-Hmelnickij: HNU, 2019. - №1. Pp. 129-136.

2. Myasishev A.A. Ispolzovanie platy ROBOTDYN MEGA2560 PRO dlya postroeniya poletnogo kontrollera geksakoptera / A.A. Myasishev // Visnik hmelnickogo nacionalnogo universitetu. Tehnichni nauki. – Hmelnickij : HNU, 2018. – № 3. – Pp. 171–179.
3. V. ChIGIN, P. Mihajlishin. eksperimentalnij bezpilotnij aviacijnij kompleks dlya fotozahoplennya. / Visnik HNU. Tehnichni nauki.-Hmelnickij: HNU, 2019. - №2. Pp. 202-206.
4. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access: <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>.
5. INAV Configurator 2.2.1. [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/2.2.1>
6. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access: <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>.
7. QUADCOPTER PID EXPLAINED. [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://oscarliang.com/quadcopter-pid-explained-tuning/>
8. F1, F3, F4 AND F7 FLIGHT CONTROLLER DIFFERENCES EXPLAINED. [Electronic resource]. – 2017. - Mode of access: <https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller>
9. Myasishev A.A. Programmirovaniye esc reguljatorov simonk-30a i emax simon-12a cherez arduino i poletnyj kontroller/ Visnik HNU. Tehnichni nauki.-Hmelnickij: HNU, 2019. - №2.-s. 228-237.
10. Open-Source flight controller software for modern flight boards. [Electronic resource]. 2018. - Mode of access: <http://cleanflight.com/>.
11. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md>.
12. Karpov V.E. PID-upravlenie v nestrogom izlozhenii. [Electronic resource]. – Moskva, 2012. – Mode of access: http://robofob.ru/materials/articles/pages/Karpov_mobline1.pdf
13. OMNIBUS F4V3. [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access: http://nic.vajn.icu/PDF/radio-controlled/OMNIBUS_F4_V3.pdf
14. Myasishev A.A. Programmirovaniye esc reguljatorov simonk-30a i emax simon-12a cherez arduino i poletnyj kontroller/ Visnik HNU. Tehnichni nauki.-Hmelnickij: HNU, 2019. - №2. Pp. 228-237.
15. Myasishev A.A. Postroenie BPLA na baze poletnogo kontrollera APM 2.6. / VISNIK HNU. Tehnichni nauki.-Hmelnickij: HNU, 2016. - №5. Pp. 225-230.

д.т.н., проф. Ленков С.В., д.т.н., проф. Мясіщев О.А.,
д.т.н., доц. Комарова Л.О., д.т.н., с.н.с. Сєлюков О.В.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ PID РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОШИВОК БПЛА

В роботі розглядається практична можливість налаштування параметрів PID регулятора для сімейства прошивок cleanflight безпілотних літальних апаратів (БПЛА) роторного типу і з нерухомим крилом під час польоту. Показано, що для цього необхідно використання апаратури радіоуправління з мінімальною кількістю каналів рівним восьми. Розроблено безпілотний літальний апарат (БПЛА) на базі польотного контролера OMNIBUSF4V3 з вбудованим гіроскопом і акселерометром, барометром / висотоміром BMP280. Розроблено схему підключення 3-х осьового компаса HMC5883L по шині I2C і GPS приймача u-blox NEO-6M до порту контролера UART6. Як прошивки використана INAV ver.2.2.1, що підтримує навігаційні функції. Спроектований квадрокоптер (БПЛА) здатний виконувати наступні польотні режими: ANGLE - автоматичне вирівнювання крену і тангажу з контролем кута горизонту, задане значення якого не може перевищуватися, чим досягається стійкий політ. Тут задіяні гіроскоп і акселерометр для утримання горизонту. NAV ALTHOLD - утримання висоти. Тут використано барометр, який сприяє утриманню висоти по тиску повітря. NAV POSHOLD - виконується утримання позиції. Використовує GPS. NAV RTH (Return To Home) - повернення додому, в точку зльоту. NAV WP - політ по заданій траєкторії, яка аппроксимирована точками. В цьому випадку в конфігураторі накладаються на обрану карту місцевості шляхові точки з такими параметрами, як висота, швидкість її польоту.

Для малих оборотів моторів показана можливість використання режиму AIR MODE для збільшення ефективності роботи PID регулятора. Показана можливість використання програми STM32 Flash loader demonstrator як програматора для прошивки польотного контролера OMNIBUSF4V3 будь прошивкою сімейства Cleanflight. Встановлено, що для налаштування параметрів P, I, D можливе використання трипозиційного перемикача на одному з каналів управління і змінного резистора на іншому каналі. Якщо отградуировать резистор на три положення можна внести корективи трьох параметрів, а на п'ять положень - 5 параметрів.

Розглянуто питання настройки стійкості польоту коптера. При різкому збільшенні дросельної заслінки можливий завал коптера в одну зі сторін і його падіння. Встановлено, що для запобігання цьому необхідно використання однаково підібраних ESC регуляторів, моторів і правильна настройка PID параметрів зокрема по YAW.

Ключові слова: OMNIBUSF4V3, PID-регулятор, INAV, GPS приймач, AIR MODE, STM32F4, HMC5883L, NEO6MV2, MPU6000

**Prof. Lienkov S.V., Prof. Myasishev A.A.,
Prof Komarova L.O., Prof Selyukov A.V.**

FEATURES OF DETERMINING THE PID REGULATOR PARAMETERS FOR UAV FIRMWARE

The paper considers the practical possibility of tuning the PID controller parameters for the cleanflight firmware family of unmanned aerial vehicles (UAVs) of a rotor type and with a fixed wing during flight. It is shown that this requires the use of radio control equipment with a minimum number of channels equal to eight. An unmanned aerial vehicle (UAV) has been developed based on the OMNIBUSF4V3 flight controller with a built-in gyroscope and accelerometer, BMP280 barometer / altimeter. The scheme of connecting the 3-axis compass HMC5883L via the I2C bus and the GPS receiver u-blox NEO-6M to the controller port UART6 is developed. The firmware used is INAV ver.2.2.1, which supports navigation functions. The designed quadcopter (UAV) is capable of performing the following flight modes: ANGLE - automatic roll and pitch alignment with horizon angle control, the set value of which cannot be exceeded, thereby achieving stable flight. A gyroscope and an accelerometer are used here to hold the horizon. NAV ALTHOLD - hold height. A barometer is used here, which helps to maintain altitude by air pressure. NAV POSHOLD - a position is being held. Uses GPS. NAV RTH (Return To Home) - return home to the take-off point. NAV WP - flight along a given path, which is approximated by waypoints. In this case, waypoints with such parameters as altitude and its flight speed are superimposed on the selected terrain map in the configurator.

For low engine speeds, the possibility of using the AIR MODE mode to increase the efficiency of the PID controller is shown. The possibility of using the program STM32 Flash loader demonstrator as a programmer for flashing the flight controller OMNIBUSF4V3 with any Cleanflight family firmware is shown. It was found that for setting the parameters P, I, D it is possible to use a three-position switch on one of the control channels and a variable resistor on the other channel. If the resistor is calibrated to three positions, three parameters can be adjusted, and five parameters to five positions. The issue of tuning the flight stability of the copter is considered. With a sharp increase in the throttle, a crash of the copter in one of the sides and its fall is possible. It was established that in order to prevent this, it is necessary to use identically selected ESC controllers, motors and the correct setting of PID parameters, in particular according to YAW.

Keywords: OMNIBUSF4V3, PID controller, INAV, GPS receiver, AIR MODE, STM32F4, HMC5883L, NEO6MV2, MPU6000.