

DOI 10.31891/2307-5732-2019-269-1-129-136
УДК 004.522

А.А. МЯСИЩЕВ

Хмельницький національний університет

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛЕТНОГО КОНТРОЛЛЕРА CC3D С ПРОШИВКОЙ INAV

Разработан беспилотный летательный аппарат (БЛА) на базе полетного контроллера cc3d с встроенным гироскопом и акселерометром, 3-осевого компаса HMC5883L, барометра/высотомера BMP180, GPS приемника u-blox NEO-6M. В качестве прошивки использована INAV ver.1.7.2, поддерживающая навигационные функции. В качестве рамы используется четырехмоторный мультиротор – квадрокоптер. Спроектированный квадрокоптер 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 – удержание позиции. Использует GPS. NAV RTH (Return To Home) — возврат домой, в точку взлета. Контроллер запоминает точку, где произведен Arming и позволяет вернуть БЛА в эту точку. Failsafe RTH — режим спасения, который отправляет БЛА домой (в точку, где произведен запуск двигателей – Arming) в случае потери связи с наземной станцией. AIR MODE – режим динамической регуляции PID регулятора, который обеспечивает полную коррекцию PID во время нулевого дросселя и дает возможность плавного полета и выполнения высшего пилотажа. Показана возможность использования программы STM32 Flash loader demonstrator в качестве программатора для замены прошивки в cc3d с OpenPilot на INAV, а также возможность ее использование для обратного возврата на прошивку OpenPilot(LibrePilot) при прошивке начального загрузчика OpenPilot(LibrePilot) с последующей прошивкой OpenPilot(LibrePilot) с помощью LibrePilot GCS. Установлено для прошивки INAV при резком увеличении дроссельной заслонки коптер, взмывая вверх, теряет устойчивость и заваливается на левую или правую сторону. Если не убавить газ и не регулировать стиками выравнивание по Roll, Pitch, коптер падает. При плавном увеличении дроссельной заслонки коптер сохраняет устойчивость при подъеме вверх. Только тщательный подбор моторов и пропеллеров позволяет устойчиво коптеру подниматься вверх при резком увеличении газа. Таким образом PID - регуляторы прошивки INAV ver.1.7.2 на контроллере cc3d плохо работают с резкими отклонениями стиков, что приводит к аварии коптера. На прошивке OpenPilot(LibrePilot) с контроллером cc3d этого не наблюдается.

Ключевые слова: cc3d, PID-регулятор, INAV, LibrePilot, GPS приемник, AIR MODE, STM32F1, Throttle PID Attenuation.

A.A. MYASISHEV

Khmelnytsky National University

OPPORTUNITIES OF FLIGHT CONTROLLER CC3D WITH INAV FIRMWARE

An unmanned aerial vehicle (UAV) based on a flight controller cc3d with a built-in gyroscope and accelerometer, 3-axis compass HMC5883L, barometer / altimeter BMP180, GPS receiver u-blox NEO-6M was developed. The firmware used is INAV ver.1.7.2, which supports navigation functions. Four motorized multirotor - quadcopter is used as a frame. The designed quadcopter is able to perform the following flight modes: ANGLE - automatic levelling of the pitch and pitch with control of the angle of the horizon, the set value of which cannot be exceeded, thus achieving stable flight. Here a gyroscope and an accelerometer are used to hold the horizon. NAV ALTHOLD - hold height. Here a barometer is used, which helps to maintain the height of the air pressure. NAV POSHOLD - position is held. Uses GPS. NAV RTH (Return To Home) - return home to the take-off point. The controller remembers the point where Arming is produced and allows you to return the UAV to this point. Failsafe RTH - rescue mode, which sends the UAV home (to the point where the engines were started - Arming) in case of loss of communication with the ground station. AIR MODE is a mode of dynamic regulation of the PID regulator, which provides full PID correction during zero throttle and enables smooth flight and aerobatic flying. The possibility of using the STM32 Flash loader demonstrator program as a programmer to replace the firmware in cc3d from OpenPilot to INAV is shown. And also the ability to use it to return to the OpenPilot (LibrePilot) firmware when flashing the OpenPilot (LibrePilot) bootloader with subsequent OpenPilot (LibrePilot) firmware using the LibrePilot GCS. It is established for INAV firmware, that with a sharp increase in the throttle, the rotor, soaring upwards, loses stability and falls to the left or right side. If you do not turn down the gas and do not adjust the alignment of Roll, Pitch, the copter drops. With a smooth increase in the throttle, the copter remains steady when it rises up. Only a careful selection of engines and propellers allows the steadily steaming upward with a sharp increase in gas. Thus, the PID regulators of the INAV ver.1.7.2 firmware on the cc3d controller do not work well with sharp deviations of sticks, which leads to a crash of the copter. This is not observed on the OpenPilot (LibrePilot) firmware with the cc3d controller.

Keywords: cc3d, PID controller, INAV, LibrePilot, GPS receiver, AIR MODE, STM32F1, Throttle PID Attenuation.

Постановка задачи

В настоящее время большой интерес представляют беспилотные летающие роботы, построенные на базе мультироторов. Среди них наибольшее распространение имеют квадрокоптеры (4 мотора). Важную роль здесь имеют полетные контроллеры с установленной в них прошивкой (программным обеспечением). Причем аппаратно одинаковые полетные контроллеры могут работать под управлением разных прошивок. Известно, что полётный контроллер – электронное устройство, управляющее полётом летательного аппарата. Термин применяется к беспилотным летательным аппаратам, а, например, к пилотируемым

летательным аппаратам обычно употребляется термин автопилот. Чаще всего термин полётный контроллер относится к управляющим устройствам мультикоптеров.

К функциям полётного контроллера относятся стабилизация аппарата в воздухе; удержание высоты при помощи барометрического высотомера или иных датчиков и позиции при помощи GPS; автоматический полёт по заданным заранее точкам; передача на землю текущих параметров полёта с помощью модема; обеспечение безопасности полёта (возврат в точку взлета при потере сигнала, автопосадка); остановка перед препятствием (для мультикоптеров) или облет препятствий (для самолетов) при наличии датчиков; подключение дополнительной периферии: OSD (On Screen Display – меню на экране), светодиодной индикации и прочего.

Количество функций полетного контроллера зависит от наличия на борту мультикоптера соответствующей периферии. В работе [1] отмечалось, что в настоящее время разработано большое количество полетных контроллеров с программным обеспечением. Это Multiwii, ArduCopter (APM 2.6, APM 2.8, PixHawk), контроллеры DJI (Naza-M Lite, DJI Naza-M V2, DJI Wookong), MicroKopter, Zero UAV X4/X6, AutoQuad, KK, XAircraft и др. Причем далеко не все из них имеют функционал, перечисленный выше. Рассмотрим особенности полетного контроллера CC3D с прошивкой INAV.

Изложение основного материала работы

CC3D (CopterControl3D) [2] это 32-битный полётный контроллер, который был разработан под проект OpenPilot для небольших беспилотных летательных аппаратов (БЛА, UAV), включая мультироторные аппараты, вертолеты и самолеты. В 2015 году после того, как команда OpenPilot прекратила поддержку полётных контроллеров CC3D был запущен новый проект для поддержки CC3D – LibrePilot [3]. В сентябре 2016 году появилась обновленная версия LibrePilot, которая работала с новым более мощным полетным контроллером Sparky2 на микроконтроллере STM32F4 и поддерживала большее количество датчиков, в частности магнитометр, GPS приемник, барометр MS5611 и др. Прошивка LibrePilot достаточно стабильно управляет квадрокоптерами, построенными на рамках 250/300 размера, но имеет недостаток – недостаточно развитые навигационные функции, например отсутствие полета по точкам. А для малых полетных контроллеров типа CC3D, NAZE32, основанных на микроконтроллерах STM32F1, – отсутствие функций удержания высоты и позиции, не говоря о функции "возврата домой". Среди существующих проектов, можно выделить проект INAV [4], который ориентирован на микроконтроллеры семейства STM32 с поддержкой навигационных функций.

INAV является ответвлением известного проекта Cleanflight [5] 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, полет по путевым точкам, режим "Следуй за мной"(Follow-Me) и другие. Поддерживается большое количество недорогих плат полетных контроллеров. Следует отметить, что платы управления полетом Naze32 и CC3D еще работают, но с ограниченными функциями. Однако для использования всех INAV функций необходимо использовать платы с микроконтроллерами STM32F3 и STM32F4 [6]. Полетные контроллеры на базе STM32F1, такие как Naze32 и CC3D, современными прошивками больше не поддерживаются, однако ранее выпущенные прошивки все еще работают – последний релиз для плат STM32F1 – это INAV 1.7.3. Рассмотрим отличие полетных контроллеров на микроконтроллерах F1 (STM32F103CBT6), F3 (STM32F303CCT6) (рис. 1):



Рис. 1. STM32 F1, F3, F4 в полетных контроллерах

- Одна и та же частота (72 МГц), но более быстрые операции с плавающей запятой у F3, благодаря отдельному модулю операций с плавающей запятой (математический сопроцессор FPU).
- Дополнительный свободный UART порт (COM-порт), у F3 их 3, F1 имеет 2 порта. CC3D позволяет использовать только 1 порт UART, например, для подключения GPS приемника. Второй UART задействован как шина I2C, к которой в данной работе подключены магнитометр и барометр. Поэтому возможно для F1 использование лишь одного UART.
- У всех последовательных портов в F3 имеется аппаратный инвертор сигнала, т.е. любой порт можно использовать с SBUS или SmartPort безо всяких модификаций.

За счет FPU F3 работает значительно быстрее, чем F1 при использовании PID контроллера на

математике с плавающей запятой, что важно для скоростных акробатических квадрокоптеров. Большим недостатком F1 является малая флеш память, где размещается прошивка. Она равна 128 КБайт. У F3 – 256 КБайт. Прошивка с использованием функций навигации занимает много памяти. Поэтому для более развитых прошивок с навигацией используют F4 с объемом флеш памяти 1 МБайт.

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. 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 = 1750 или ниже (предполагается, что диапазон изменения дросселя составляет 1000-2000), а затем медленно необходимо увеличить TPA, пока колебания квадрокоптера не исчезнут. На рисунке 2 показан пример мультитротторной 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 квадрокоптера, резких поворотов из-за уменьшения воздействия PID регулятора на стабилизацию полета квадрокоптер падает. Airmode обеспечит полную коррекцию PID во время нулевого дросселя и дает возможность плавного полета и выполнения высшего пилотажа.

Выше было отмечено, что полетные контроллеры cc3d evo поставляются с прошивкой OpenPilot (LibrePilot). Для использования прошивки INAV cc3d необходимо перепрошить. Прошивка поставляется файлом с расширением .hex, поэтому начальный загрузчик LibrePilot теряется и его при обратном переходе к LibrePilot необходимо восстановить с использованием программатора. В работе стоит задача построения квадрокоптера, который должен уметь удерживать высоту по барометру, позицию по GPS приемник и возвращаться домой. Исходными данными являются:

1. Рама f450
2. Четыре пропеллера 10x45
3. Полетный контроллер cc3d evo с гироскопом и акселерометром
4. Компас HMC5883L и барометр BMP180 на шине I2C
5. GPS приемник GY-GPS6MV2(GY-NEO6MV2)
6. Батарея Li-po 3S1P 4200mAh

Для решения задачи копируется прошивка INAV ver. 1.7.2 с сайта <https://github.com/iNavFlight/inav/releases/tag/1.7.2>, а конфигурактор inav ver. 1.7.3 – <https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/1.7.3>

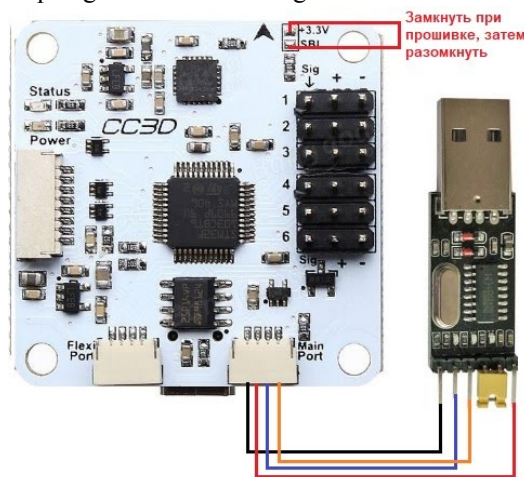


Рис. 3. Подключение cc3d при программировании

После успешной прошивки отключается конвертер CH340 от cc3d и размыкается замкнутый контакт (рис. 3). На компьютере устанавливается конфигурактор INAV ver.1.7.3 и cc3d подключается к компьютеру через порт mini USB. После нажатия на кнопку Connect на конфигуракторе должно появиться

TPA Breakpoint = 1500, TPA = 50%

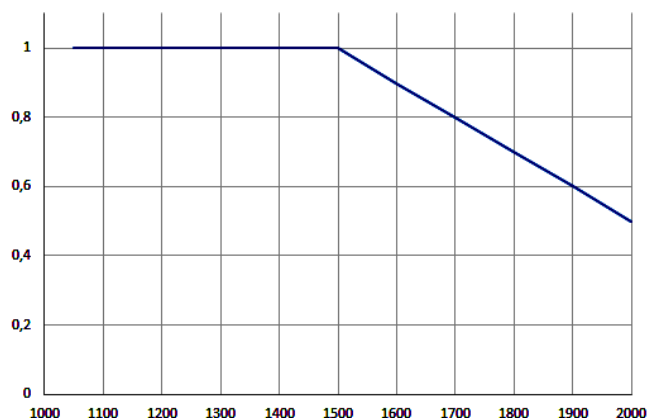


Рис. 2. Пример мультитротторной кривой TPA

configurator/releases/tag/1.7.3

Для контроллера cc3d (с микроконтроллером STM32F1) версия прошивки 1.7.3 является последней. Здесь выбрана версия 1.7.2. Для прошивки cc3d используется программа STM32 Flash loader demonstrator с сайта <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>. Для прошивки используется подключение cc3d к USB компьютера через конвертер USB to TTL на базе микросхемы CH340 (рис. 3).

Для правильной работы программы STM32 Flash loader demonstrator необходимо вначале вставить в порт USB компьютера конвертер, а затем подключить его к cc3d через порт Main Port. После запуска программы STM32 Flash loader demonstrator необходимо выполнить последовательность действий в соответствии с рисунком 4 и далее правильно отвечая на вопросы при работе программатора [14].

изображение, как на рис. 5.

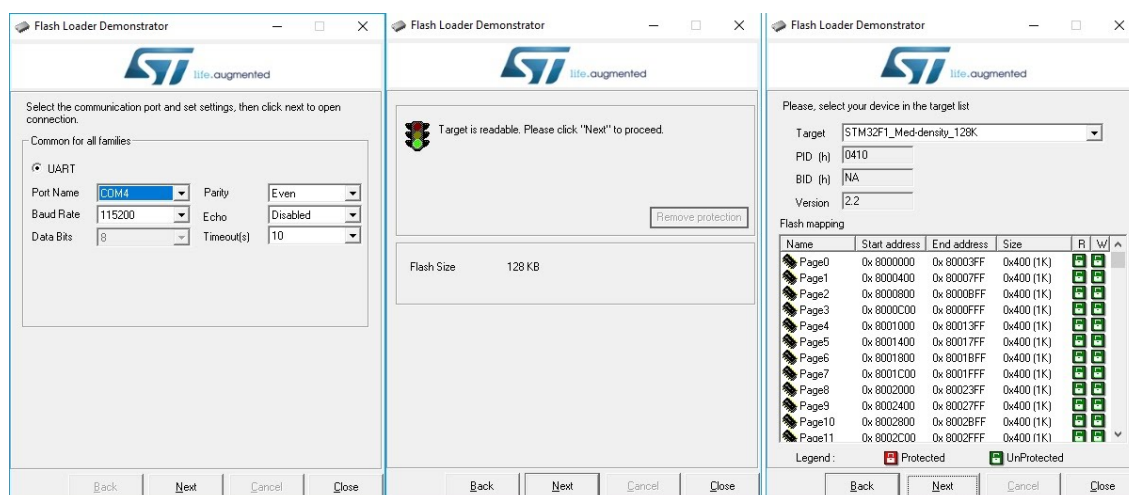


Рис. 4. Работа с STM32 Flash loader demonstrator (выбор com порта, успешное подключение к cc3d и идентификация контроллера STM32F1 с flash 128K)

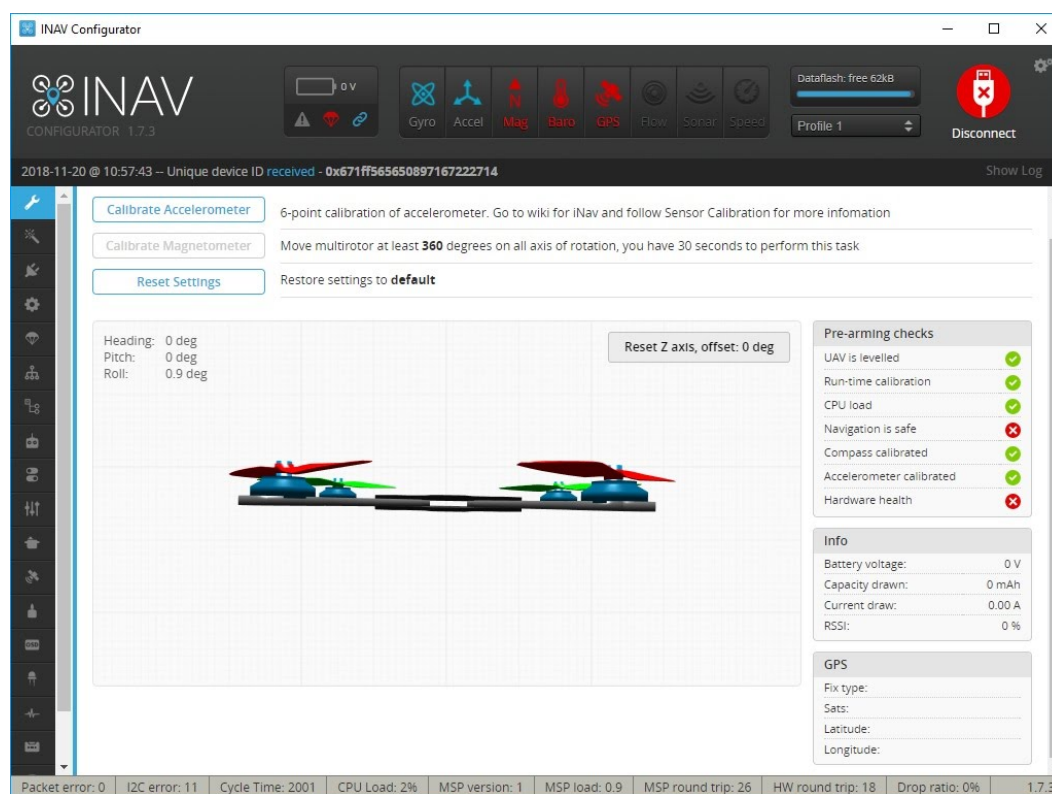


Рис. 5. Загрузка конфигуратором прошивки с cc3d. Показана настроенная прошивка

Для настройки прошивки выполняется последовательность действий в соответствии с рисунками.

1. Необходимо зайти во вкладки Ports и Configuration и обратить внимание на установку параметров, подчеркнутых красным. Контроллер cc3d должен быть полностью установлен на квадрокоптере с подключенными моторами и со снятыми пропеллерами. Батарея Lipo должна быть подключена, иначе напряжения питания на барометр, компас, приемник GPS поступать не будет (рис. 6)

Во вкладке Receiver, после включения приемника, выполняется перемещение всех стиков и тумблеров на пульте управления. Полоски на рисунке должны двигаться в соответствии со стиками [8].

2. Выполняется вход во вкладку Motors, включаются моторы, как представлено в [8] и перемещаются движки для каждого мотора. Они должны раскручиваться в соответствии с их номерами подключения к контроллеру как на верхнем левом рисунке. Направление вращения также должно соответствовать рисунку. В противном случае необходимо поменять местами два любых вывода двигателя.

3. На вкладке Setup выполняем калибровку Accelerometer. Для этого квадрокоптер устанавливается в разные положения как на рис. 7 и после каждого из них выполняется нажатие на кнопку Calibrate Accelerometer.

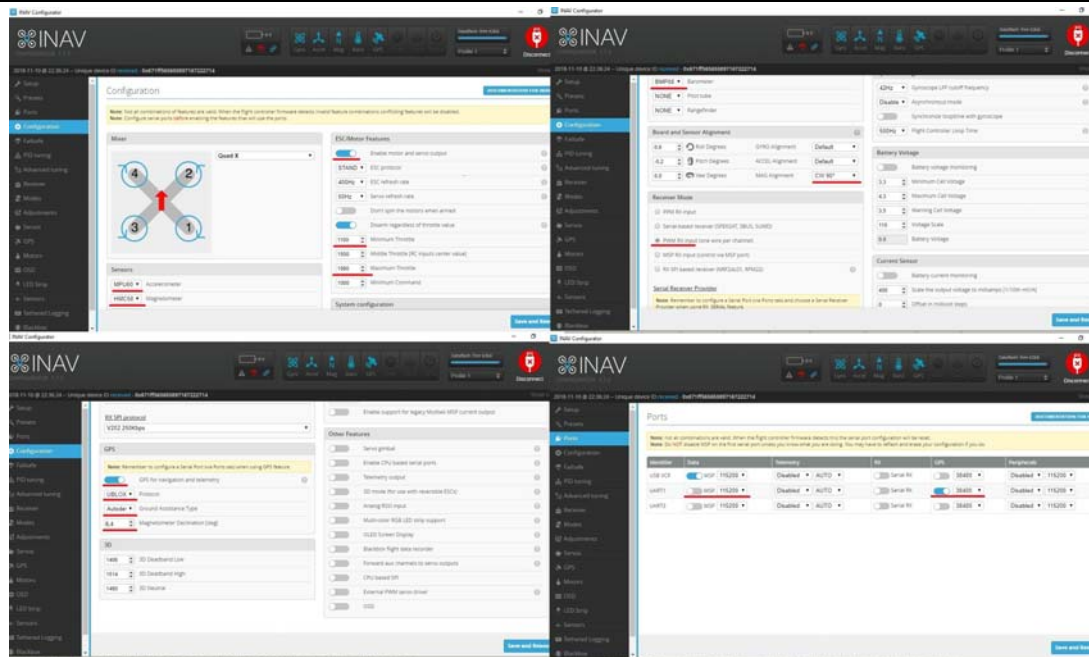


Рис. 6. Вкладки Configuration и Ports

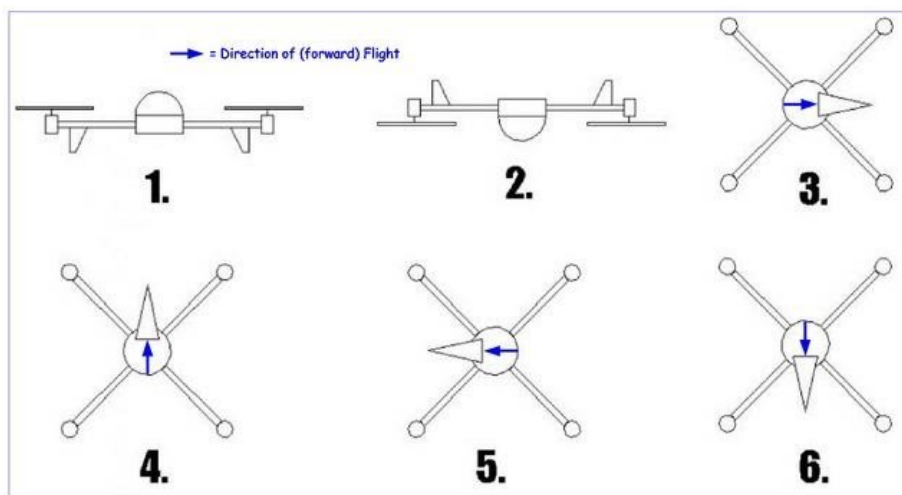


Рис. 7. Калибровка акселерометра

5. Выполняется вход во вкладку PID tuning и устанавливаются PID-ы в соответствии с рис. 8. А во вкладке Advanced tuning и устанавливаются параметры в соответствии источником [8].

6. Во вкладке Modes устанавливаются полетные режимы. Вначале необходимо установить режим полета ANGLE – на тумблере (AUX1). Это такой режим, что при максимальных отклонениях стиков квадрокоптер не перевернется. По умолчанию установлен режим ACRO, при котором квадрокоптер может отклоняться на любой угол вплоть до переворачивания. С режимом ANGLE совмещаем AIR MODE. Как уже отмечалось он позволяет при малых оборотах двигателей удерживать заданные значения PID регуляторов. В противном случае квадрокоптер, например, при резком спуске, будет раскачиваться вплоть до переворота. Далее на AUX1 устанавливаются режимы NAV ALTHOLD (удержание высоты) и NAV POSHOLD (удержание позиции). На тумблере AUX2 устанавливается режим NAV RTH (возврат домой).

7. Во вкладке Failsafe устанавливается режим возврата домой RTH в случае потери связи с пультом управления [8].

8. Калибровка компаса выполняется в поле перед запуском. Можно ее выполнить также и в лаборатории, но металлические предметы должны находиться на расстоянии. При калибровке должна быть выполнена определенная комбинация стиков. Левый стик вверх и вправо, правый вниз и удерживать эту комбинацию 1-2 сек. После этого в течении 30 сек. необходимо вращать коптер на 360 град по всем его осям.

9. При уводе коптера влево, вправо, вперед и назад при отсутствии ветра, выполняется программная калибровка с помощью пульта. Коптер устанавливается в горизонтальном положении на земле, верхний стик поднимается вверх, а правый перемещается до упора в сторону, противоположную смещению коптера. Например, если стики так держать в течении 4 сек, происходит изменение угла по Roll, Pitch примерно на 2 градуса.

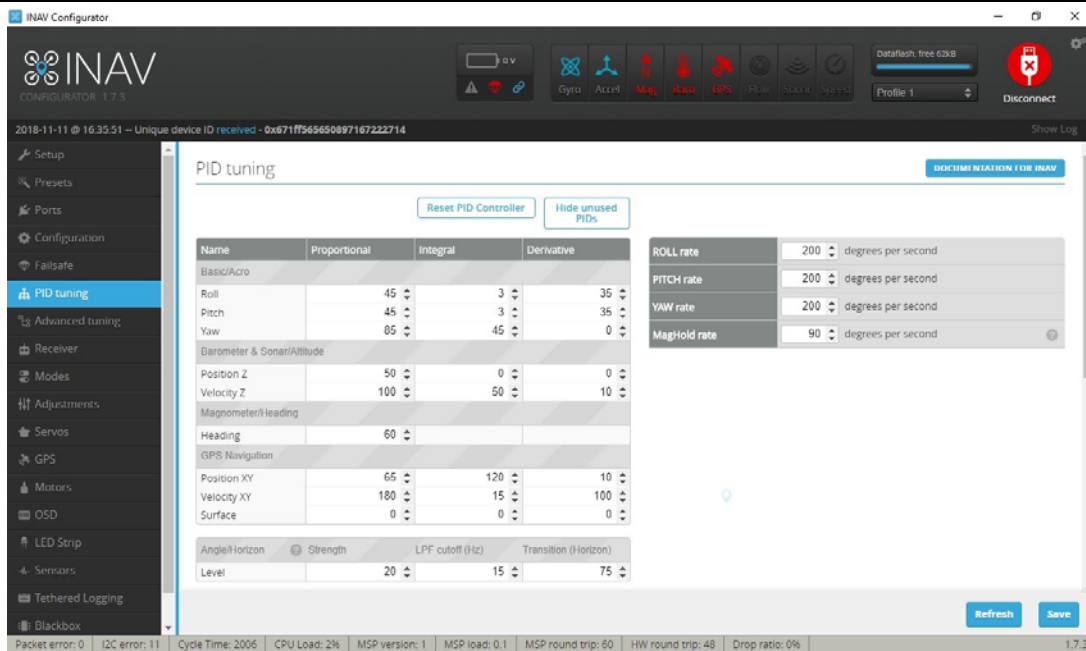


Рис. 8. Установка параметров PID регулятора

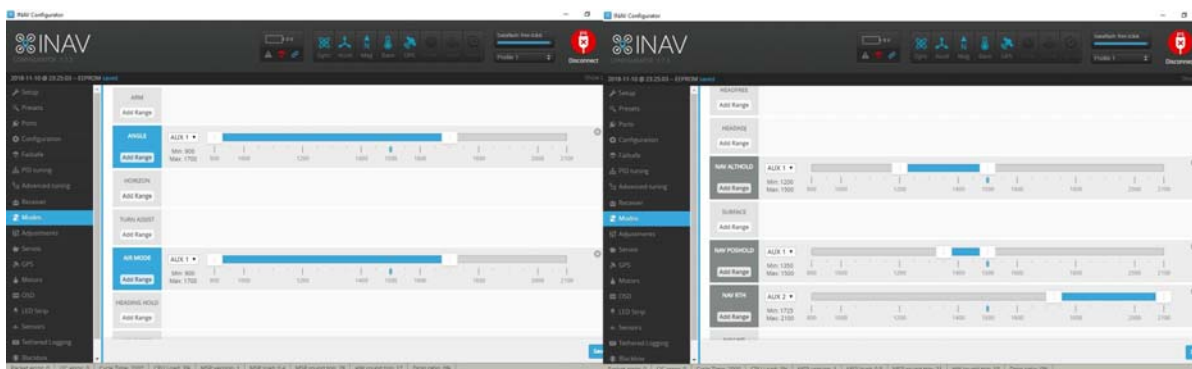


Рис. 9. Установка режимов полета во вкладке Modes

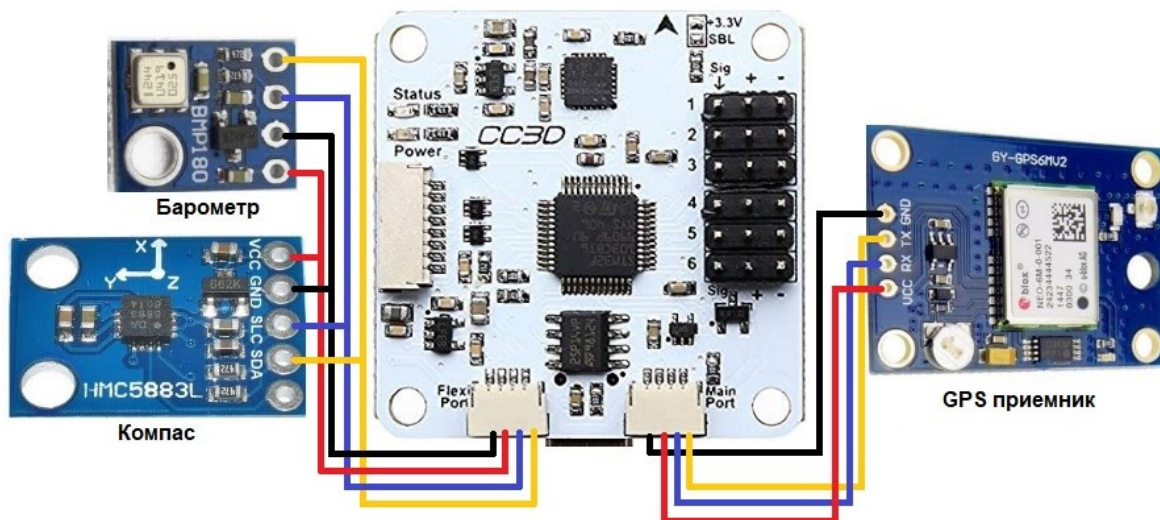


Рис. 10. Подключение к cc3d компаса, барометра, GPS приемника

Подключение к cc3d компаса, барометра, GPS приемника показано на рис. 10. Компас должен находиться над плоскостью вращения пропеллеров на высоте не менее 15 см.

Подключение приемника FS-IA6 системы управления к контроллеру cc3d показано на рис. 11

Калибровка регуляторов ESC, выполняется в вкладке Motors [8]. Для этого снимаются пропеллеры и отключается аккумулятор. Далее выполняется переход на вкладку Motors в конфигураторе и включаются моторы [8]. После перемещения слайдера Master вверх, на все двигатели будет подан полный газ. Теперь выполняется подключение аккумулятора – двигатели перейдут в режим калибровки. Далее передвигается слайдер Master полностью вниз, для установки уровня газа на ноль. Двигатели начнут пищать (проиграют

музыкальную мелодию), что означает завершение калибровки.

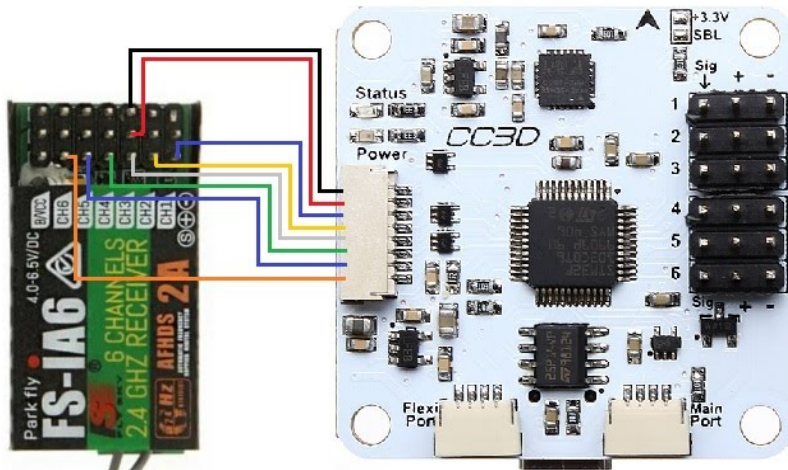


Рис. 11. Подключение приемника FS-IA6 системы управления к контроллеру cc3d

set nav_rth_tail_first = ON. Для разрешения арминга без спутников используется команда set nav_extra_arming_safety = OFF. Для выполнения этих команд полетным контроллером квадрокоптера их необходимо сохранить командой save. Все эти команды вводятся во вкладке CLI [9].

На рис. 12 представлено фото собранного квадрокоптера.

В прошивке INAV предусмотрен командный режим изменения параметров прошивки, которые не представлены во вкладках конфигуратора INAV. Так для изменения угла наклона коптера с 30 град. на 40 град. для ускорения полета при максимальном отклонении стиков по Roll, Pitch используются команды set max_angle_inclination_roll = 400, set max_angle_inclination_pitch = 400. Для возврата домой "хвостом" (без разворота квадрокоптера) нужно выполнить команду



Рис. 12. Фото квадрокоптера на контроллере cc3d

Выводы

1. Построен квадрокоптер на полетном контроллере cc3d, перепрошитый с прошивки OpenPilot (LibrePilot) на прошивку INAV ver.1.7.2

2. С прошивкой INAV появилась возможность к полетному контроллеру cc3d подключить магнитометр, барометр и GPS приемник, вследствие чего появились навигационные функции, т.е. удержание высоты, позиции, возврат домой.

3. Показана возможность использования программы STM32 Flash loader demonstrator в качестве программатора для замены прошивки в cc3d с OpenPilot на INAV. Возможно ее использование для обратного возврата на прошивку OpenPilot (LibrePilot) при прошивке начального загрузчика OpenPilot (LibrePilot) с последующей прошивкой OpenPilot (LibrePilot) с помощью LibrePilot GCS [7].

4. При резком увеличении дроссельной заслонки(газа) коптер взмывает вверх, теряет устойчивость и заваливается на левую или правую сторону. Если не убавить газ и не регулировать стиками выравнивание по Roll, Pitch, коптер падает. При плавном увеличении дроссельной заслонки коптер сохраняет устойчивость при подъеме вверх. Только тщательный подбор моторов и пропеллеров позволил устойчиво подниматься вверх при резком увеличении газа. Таким образом PID-регуляторы прошивки INAV ver.1.7.2 на контроллере cc3d плохо работают с резкими отклонениями стиков, что приводит к аварии коптера. На прошивке OpenPilot (LibrePilot) с контроллером cc3d этого не наблюдается.

5. Для нулевого газа проблема плохой работы PID решена установкой режима AIR MODE. Без режима AIR MODE при резком сбросе дроссельной заслонки(газа) коптер теряет устойчивость и падает. На прошивке OpenPilot (LibrePilot) с контроллером cc3d этого не наблюдается.

Література

1. Мясичев А.А. Построение БПЛА на базе полетного контроллера APM 2.6. / А.А. Мясичев // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 5. – С. 225–230.
2. CopterControl3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : <http://multicopterwiki.ru/index.php/CopterControl3D>.
3. The LibrePilot open source project [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : <http://www.librepilot.org/site/index.html>.
4. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>.
5. Open-Source flight controller software for modern flight boards [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <http://cleanflight.com/>.
6. F1, F3, F4 AND F7 FLIGHT CONTROLLER DIFFERENCES EXPLAINED [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : <https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller>.
7. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>.
8. Мясичев А.А. Квадрокоптер с прошивкой INAV ver. 1.7.2 на полетном контроллере cc3d evo с режимами удержания высоты, позиции, возврата домой [Electronic resource] / Мясичев А.А. – 2018. – Mode of access : <https://sites.google.com/site/webstm32/inav-cc3d>,
9. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md>.
10. 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.
11. Мясичев А.А. Режимы полёта контролерів полёту APM 2.6 I PIXHAWK БПЛА / А.А. Мясичев, В.В. Швець // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 1. – С. 78–82.
12. Мясичев А.А. Система навігації безпілотного наземного апарату на ARDUINO / А.А. Мясичев, А.П. Фарина // Вісник хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – № 4. – С. 173–177.
13. U-center Windows. GNSS evaluation software for Windows [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://www.u-blox.com/en/product/u-center-windows>.
14. Flashing the OpenPilot bootloader on a CC3D or Flashing Beta/Borisflight Hex on a CC3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : http://www.southquay3d.com/index.php?route=news/article&news_id=9.

References

1. Miasyshchev A.A. Postroyeniye BPLA na baze poletnoho kontrollera APM 2.6. / A.A. Miasyshchev // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2016. – № 5. – S. 225–230.
2. CopterControl3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : <http://multicopterwiki.ru/index.php/CopterControl3D>.
3. The LibrePilot open source project [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : <http://www.librepilot.org/site/index.html>.
4. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>.
5. Open-Source flight controller software for modern flight boards [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <http://cleanflight.com/>.
6. F1, F3, F4 AND F7 FLIGHT CONTROLLER DIFFERENCES EXPLAINED [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : <https://oscarliang.com/f1-f3-f4-flight-controller>.
7. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>.
8. Miasyshchev A.A. Kvadrokopter s proshyvkoj INAV ver. 1.7.2 na poletnom kontrollere cc3d evo s rezhymamy uderzhaniya vysoty, pozitsii, vozvrata domoi [Electronic resource] / Miasyshchev A.A. – 2018. – Mode of access : <https://sites.google.com/site/webstm32/inav-cc3d>,
9. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md>.
10. Miasyshchev A.A. Yspolzovaniye platy ROBOTDYN MEGA2560 PRO dlia postroyeniya poletnoho kontrollera heksakoptera / A.A. Miasyshchev // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – № 3. – S. 171–179.
11. Miasyshchev A.A. Rezhymy polotu kontroleriv polotu APM 2.6 I PIXHAWK BPLA / A.A. Miasyshchev, V.V. Shvets // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – № 1. – S. 78–82.
12. Miasyshchev A.A. Sistema navihatsii bezpilотноho nazemnoho aparatu na ARDUINO / A.A. Miasyshchev, A.P. Faryna // Herald of khmelnytskyi national university. Technical sciences. – Khmelnytskyi : KhNU, 2018. – № 4. – S. 173–177.
13. U-center Windows. GNSS evaluation software for Windows [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://www.u-blox.com/en/product/u-center-windows>.
14. Flashing the OpenPilot bootloader on a CC3D or Flashing Beta/Borisflight Hex on a CC3D [Electronic resource]. – 2015. – Mode of access : http://www.southquay3d.com/index.php?route=news/article&news_id=9.

Рецензія/Peer review : 10.1.2019 р.

Надрукована/Printed : 16.2.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією