

## ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОШИВКИ INAV НА ПОЛЬОТНОМУ КОНТРОЛЕРІ OMNIBUS F4V3 ДЛЯ БПЛА РОТОРНОГО ТИПУ

В роботі розглядається практична можливість налаштування параметрів PID регулятора для прошивки INAV (сімейство 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, рівною восьми. Розроблено безпілотний літальний апарат (БПЛА) на базі польотного контролера OMNIBUSF4V3 з вбудованим гіроскопом і акселерометром, барометром/висотоміром BMP280. Розроблено схему підключення 3-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. Спроекований 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 апроксимована точками. В цьому випадку в конфігураторі накладаються на обрану карту місцевості шляхові точки з такими параметрами, як висота, швидкість її прольоту. 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-якою прошивкою сімейства Cleanflight. Встановлено, що для налаштування параметрів P, I, D, а також параметрів навігаційного регулятора можливе використання трипозиційного перемикача на одному з каналів управління і змінного резистора на іншому каналі. Розглянуто питання настройки стійкості польоту коптера. При різкому збільшенні дросельної заслінки 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. Встановлено неможливість настройки магнітометра HMC5883L для забезпечення прямолінійного польоту коптера в режимі Cruise через його похибки. Так, під час установки на північ з кутом 0 градусів і подальшим його розворотом на 180 градусів, програмне забезпечення INAV інтерпретує поворот не на 180, а на 191 градус. Це призводить до відведення коптера від прямолінійного руху незважаючи на правильну установку магнітного відхилення.

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

A.A. MYASISHEV  
Khmelnytsky National University

### FEATURES OF INAV FIRMWARE IMPLEMENTATION ON OMNIBUSF4V3 FLIGHT CONTROLLER FOR UAV

The paper considers the practical possibility of adjusting the PID controller parameters for INAV firmware (Cleanflight firmware family) of rotary-type unmanned aerial vehicles (UAVs) 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, which ensures a 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 to increase the efficiency of the PID controller is shown. The possibility of using the STM32 Flash loader demonstrator program as a programmer for flashing the OMNIBUSF4V3 flight controller with any Cleanflight family firmware is shown. It was found that to configure the parameters P, I, D, as well as the parameters of the navigation controller, it is possible to use a three-position switch on one of the control channels and a variable resistor on the other channel. 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. The impossibility of adjusting the HMC5883L magnetometer to ensure straight-line flight of the copter in Cruise mode due to its error is established. So when installed to the north with an angle of 0 degrees and its subsequent rotation by 180 degrees, the INAV software interprets the rotation not of 180, but of 191 degrees. This leads to the drift away from the rectilinear movement despite the correct installation of magnetic declination.

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

### Постановка задачі

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) роторного типу (квадрокоптера, гексакоптери та ін.), з нерухомим крилом (літаки, літаючі крила) для забезпечення утримання горизонтального польоту використовують класичні PID регулятори [1, 2, 14]. Для управління польотом перерахованих вище БПЛА

найбільш часто використовують польотні контролери на базі мікроконтролерів STM32F4, STM32F7 з прошивками betaflight, cleanflight, INAV [1, 5, 10]. Перші дві прошивки використовуються в основному на невеликих квадрокоптерах, дуже динамічних і розвиваючих високі швидкості. Вони не використовують навігаційне обладнання, таке як компас, барометр, GPS приймач для утримання позиції, повернення в точку старту і польоту по точках заданої траєкторії. Прошивка INAV використовується і для великих коптерів, літаючих крил, на яких встановлено навігаційне обладнання. В основному ця прошивка застосовується для далеких польотів з використанням курсової камери (політ по FPV). Такі польоти небезпечні тим, що при втраті зв'язку з відеопередавачем втрачається інформація про стан БПЛА і він відлітає в невизначене місце розташування. Для цього в прошивці INAV існує можливість використання навігаційної апаратури, яка дозволяє по GPS приймачу, магнітометру, барометру в разі втрати радіозв'язку повернутися в положення старту або на відстань, доступне для радіозв'язку. Однак для сталого польоту БПЛА, особливо в вітряну погоду, на високих швидкостях з різкими змінами траєкторії (динамічні маневри), повинен бути ідеально налаштований PID [1, 7, 11, 12] регулятор, підібраний його три параметра – P, I, D і навігаційні PID-и для польоту по барометру, компасу і приймачу GPS. В даний час не існує аналітичного вирішення цього завдання для різної геометрії, ваги БПЛА. Це завдання вирішується дослідним шляхом в польоті для різних типів, розмірів, ваги, встановленого обладнання БПЛА. В роботі розглядається, як це реалізовано за допомогою апаратури радіо управління для перерахованих типів прошивок так як вони мають аналогічний PID регулятор. Перед налаштуванням регулятора розглядається особливість побудови чотирьохроторного БПЛА (квадрокоптера) на базі польотного контролера OMNIBUSF4V3 [8] з прошивкою INAV Ver.2.2.1 [10], яка є останньою на момент написання роботи. Приділено увагу настройки польоту по заданій траєкторії з використанням шляхових точок в INAV конфігураторі ver.2.2.1. Розглядається настройка параметрів навігаційного PID регулятора.

### Виклад основного матеріалу роботи

INAV є відгалуженням відомого проекту Cleanflight [1, 13] з акцентом на функції GPS для літаків і мультироторних моделей. INAV активно розвивається і в даний час підтримує режими RTH (Return To Home) з визначеною висотою набору висоти, утримання позиції, польоту по подорожнім точкам (ver.1.9.1), режим "Йди за мною" (Follow-Me) та інші. Особливістю прошивки INAV є можливість динамічно регулювати посилення PID, тому високий дросель (прискорений політ вперед або швидкий набір висоти) не викликає високочастотних коливань квадрокоптера, характерних для високих значень складової P в PID регуляторі. Для цього вводиться параметр TPA [Throttle PID Attenuation]. TPA забезпечує зменшення значення PID по відношенню до повного дроселя. Він використовується для гасіння значень PID при досягненні повного газу. Чисельно TPA дорівнює відсотку гасіння, яке матиме місце при повному відкритті дросельної заслінки. TPA Breakpoint – точка на кривій газу, з якої почне застосовуватися TPA. Нижче цієї точки TPA не використовується. Наприклад, якщо виникають коливання, що починаються з 1/2 дроселя, необхідно встановити TPA Breakpoint = 1500 або нижче (передбачається, що діапазон зміни дроселя складає 1000–2000), а потім повільно необхідно збільшити TPA, поки коливання квадрокоптера не зникнуть. На рис. 1 показаний приклад мультироторної кривої TPA.

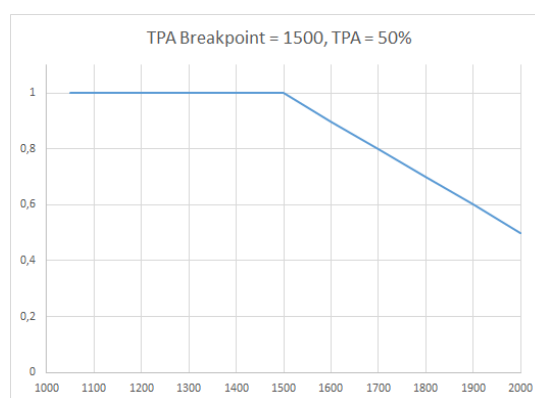


Рис. 1. Приклад мультироторної кривої TPA

Для динамічної регуляції посилення PID дуже важливо встановити режим AIRMODE. У стандартному режимі зменшення дросельної заслінки, коли розраховуються крен, тангаж і ризикання, всі двигуни будуть зменшувати обороти однаково. При розвороті деякі двигуни можуть навіть відключатися. Це призводить до зменшення посилення PID регулятора. Тому при різкому зниженні квадрокоптера, різких поворотів через зменшення впливу PID регулятора на стабілізацію польоту квадрокоптер падає. Airmode забезпечить повну корекцію PID під час нульового дроселя і дає можливість плавного польоту і виконання вищого пілотажу.

Починаючи з ver.2.3.0 введений режим Anti-gravity. Він дозволяє утримувати кут тангажу (pitch) стабільним, щоб не було кивків. Наприклад, при різкому збільшенні числа обертів двигуна (Throttle), а потім їх скиданні спостерігаються кивки в той момент, коли коптер підвісає в невагомості (розгойдування по тангажу). Завдання Anti-gravity тримати кут шляхом збільшення I-коефіцієнта PID регулятора. Це робиться

за допомогою параметра `antigravity_gain = 2`.

Для побудови тестового квадрокоптера використовувалися наступні компоненти:

1. Рама розміром 450 мм
2. Мотори A2212/1000 з ESC регуляторами на 30A [9]
3. Пропелери 10×45 дюймів
4. Пальотний контролер OMNIBUSF4V3[8] на базі мікроконтролера STM32F405 LQFP64 (168Mhz, 1M Flash, 192kB SRAM) з вбудованим гіроскопом, акселерометром MPU6000 і барометром BMP280
5. Компас HMC5883L підключений до шини I2C
6. GPS приймач NEO6M

Істотно, що компас і приймач GPS мають різні джерела живлення. В іншому випадку спостерігалися збої і зависання компаса, а також помилки по шині I2C.

Для харчування моторів і електроніки встановлена батарея літо 3S1P 1800mAh. Вона забезпечувала політ протягом 11–13 хвилин. Квадрокоптер повинен вміти утримувати висоту (барометр), позицію (GPS приймач) і повертатися додому і літати по заданій траєкторії (до 60 польотних точок).

На рис. 2 представлений польотний контролер OMNIBUSF4V3 з позначенням його основних виводів для підключення до датчиків, моторів, приймача і відеопередавача.

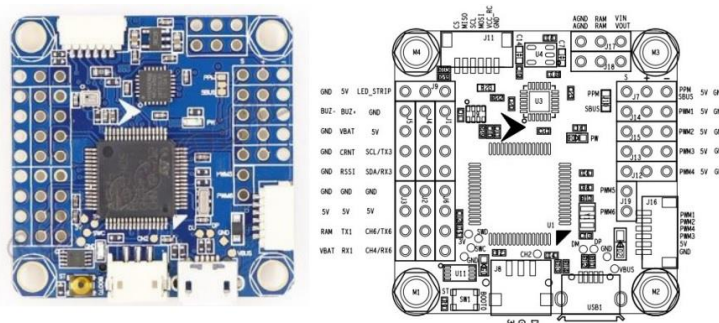


Рис. 2. Польотний контролер OMNIBUSF4V3

Для виконання завдання потрібно прошивка контролера, яка копіюється з сайту [https://github.com/iNavFlight/inav/releases/download/2.2.1/inav\\_2.2.1\\_OMNIBUSF4V3.hex](https://github.com/iNavFlight/inav/releases/download/2.2.1/inav_2.2.1_OMNIBUSF4V3.hex), і конфігуратор `inav ver.2.2.1` - [https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/download/2.2.1/INAV-Configurator\\_win32\\_2.2.1.zip](https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/download/2.2.1/INAV-Configurator_win32_2.2.1.zip). Для прошивки OMNIBUSF4V3 використовувалася програма STM32 Flash loader demonstrator з сайту <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html> і конвертер USB to TTL на базі мікросхеми CH340. Процедура прошивки описана в роботі [1] для польотного контролера cc3d, яка аналогічна прошивці OMNIBUSF4V3. Підключення конвертера виконується до виводів TX1, RX1 контролера OMNIBUSF4V3 (рис. 2).

Підключення до OMNIBUSF4V3 компаса, GPS приймача, приймача радіоуправління по PPW, моторів показано на рис.3. Компас повинен знаходитися над площиною обертання пропелерів на висоті не менше 15 см для зменшення перешкод при роботі моторів. Підключення приймача радіоуправління можливо і по шині SBUS, проте це призведе до використання додаткового порту UART у мікроконтролера. Важливим є те, що необхідна установка перемички при виборі PPW або SBUS. Ця перемичка розташована в правій верхній частині контролера (рис. 2).

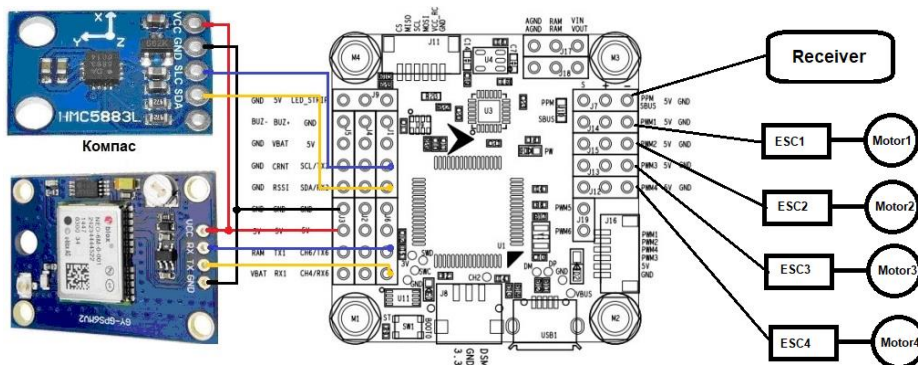


Рис. 3. Схема підключення до польотного контролера

Після підключення згідно рисунку 3 необхідно запуснути конфігуратор INAV і послідовно заходити у вкладки і виконувати настройки параметрів. У вкладці Ports на рядку UART6 в позиції Sensors встановлюється GPS зі швидкістю 38400. У вкладці Mixer вибирається Quad X і натискається кнопка Load and apply. Після виходу з кожної вкладки виконується збереження (кнопка save). У вкладці Configuration в якості Sensors повинні бути встановлені MPU6000 (Accelerometr), HMC5883 (Magnetometer), BMP280

(Barometer). У розділі Board and Sensor Alignment встановлюється MAG alignment – CW 90. Це відповідає розташуванню компаса, повернутого на 90 градусів. Receiver Mode – PPM RX input – режим роботи приймача. У розділі GPS включається GPS і встановлюється протокол UBLOX. У розділі ESC/Motor Features включається Enable motor and servo output. Встановлюється протокол, наприклад ONESHOT125 [10]. У вкладці PID tuning попередньо встановлюються параметри PID регулятора, як на рис. 4. Їх налаштування розглянута нижче.

Name	Proportional	Integral	Derivative	FeedForward
<b>Basic/Acro</b>				
Roll	47	13	40	0
Pitch	47	13	40	0
Yaw	100	60	0	0
<b>Barometer &amp; Sonar/Altitude</b>				
Position Z	40	0	0	
Velocity Z	70	50	10	
<b>Magnetometer/Heading</b>				
Heading	60			
<b>GPS Navigation</b>				
Position XY	25			
Velocity XY	20	10	60	40
Surface	0	0	0	

ROLL rate	150	degrees per second
PITCH rate	150	degrees per second
YAW rate	150	degrees per second
Max. ROLL angle	35,0	degrees
Max. PITCH angle	35,0	degrees
Manual ROLL rate	100	%
Manual PITCH rate	100	%
Manual YAW rate	100	%
MagHold rate	90	degrees per second

Рис. 4. Параметри PID регулятора

У вкладці Motors після включення вимикача "I understand the risks, propellers are removed - Enable motor control" необхідно проконтролювати, в який бік обертаються мотори відповідно до рисунку. Якщо мотор обертається не в той бік, змінюється підключення двох з трьох проводів мотора до ESC регулятора. У вкладці Receiver контролюється робота каналів приймача. Переміщення стіків і включення і виключення активних тумблерів на пульті управління повинно відобразитися у вкладці адекватно. У вкладці Modes встановлюються польотні режими квадрокоптера відповідно до роботи [1].

У розглянутій версії INAV можлива настройка польотної місії – Mission Control (політ по заданій траєкторії із зазначенням шляхових точок, рис. 5). Тут виробляється вибір ділянки карти. Повинен бути доступ до Інтернет. Вказуються натисканням клавішею мишки шляхові точки. Кожна шляхова точка після другого натискання на неї мишкою висвічує свої координати з параметрами висоти прольоту над нею і швидкістю. Ці значення необхідно відредагувати. Якщо необхідно повернутися до того місця старту з автоматичною посадкою, ставлять галочку на RTH at the end of the mission і на Landing. Сформований маршрут записується командами Save mission to FC і Save Eeprom mission. Політ по точках може бути виконаний, якщо у вкладці Modes буде встановлений перемикач на пульті радіоуправління в польотний режим NAV WP.

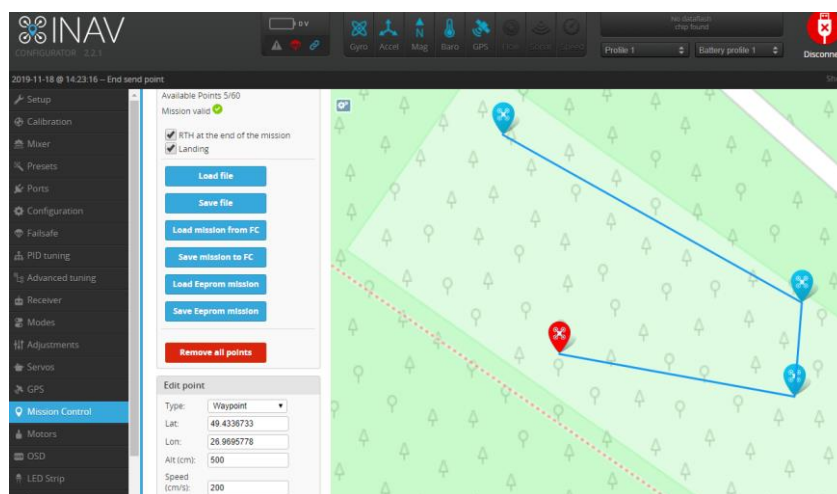


Рис. 5. Формування польотної місії по шляховим точкам

Точка, в яку повертається квадрокоптер після завершення місії на карті не відображається. Ця точка відповідає точці запуску, яка може перебувати в будь-якому місці. Послідовність проліта точок квадрокоптером відповідає послідовності формування точок на карті.

Важливо. При відключенні польотного контролера від батареї місія втрачається. Якщо після

включення місію не завантажити з EEPROM пам'яті в SRAM пам'ять польотного контролера, квадрокоптер не буде виконувати автоматичний політ по траєкторії після встановлення перемикача на пульті управління в режим польоту по точкам. Тому після підключення батареї на пульті управління необхідно виконати переміщення стіків, як на малюнку 6 для виконання процедури Load waypoint mission. Після цього можна виконувати Arming квадрокоптера і злітати з подальшим перемиканням режиму польоту в положення NAV WP.

### Mode 2 Stick Functions

Profile 1		Enter OSD Menu (CMS)	
Profile 2		In-flight Calibration Controls	
Profile 3		Trim Acc Left	
Battery profile 1		Trim Acc Right	
Battery profile 2		Trim Acc Forwards	
Battery profile 3		Trim Acc Backwards	
Calibrate Gyro		Save waypoint mission	
Calibrate Acc		Load waypoint mission	
Calibrate Compass		Save Setting	

Рис. 6. Команди пульта управління

Доцільно змінити параметр `nav_wp_radius` зі 100 на 200. Шляхова точка вважається досягнутою, якщо коптер потрапляє в радіус в см, визначений цим параметром. Це дозволить при підльоті до точки зльоту під час виконання RTH, польоту за точками в разі сильного вітру або неточних навігаційних PID, не цілитися коптер з точністю до 100 см, а тільки потім починати зниження. Точності 200 см цілком достатньо. Знижуючись, коптер встигає підкоригувати позицію.

У вкладці Calibration необхідно виконати калібрування Accelerometra і Compass. Схема калібрування Accelerometra показана на рисунку вкладки. Для цього попередньо натискається кнопка Calibrate Accelerometr. При калібрування компаса квадрокоптер необхідно обертати по 6-и осях. На цю процедуру виділяється 30 секунд. Калібрування в поле виконується переміщенням стіків на пульті управління за правилом: лівий стик вгору і вправо, правий стик вниз протягом 2-3секунд. Після цього коптер обертається за 6-а осями (рис. 6).

При польоті коптера в автоматичному режимі настроюються параметри у вкладці Advanced tuning.

Зазвичай настройка ведеться в двох основних розділах. Це Multicopter Navigation Settings і RTH and Landing Settings.

- Multicopter Navigation Settings.

User Control Mode:

Altitude – у цьому режимі коптер в меншій мірі відстежує своє становище по супутникам. Наприклад, включається польотний режим NAV POSHOLD – утримання позиції. Якщо стіком пульта дати переміщення вперед, координати із супутника не будуть сприйматися коптером. Але в разі повернення стіка в нейтральне положення, коптер визначить координати з супутника і повернеться в положення, коли стик зайняв нейтральну позицію. При великій швидкості можливий переліт позиції і коптер буде повертатися назад в точку нейтрального положення стіка. Коптер в цьому режимі більш динамічний, ніж в режимі Cruise і він використовується для малих коптерів.

Cruise – тут при переміщенні стіків з нейтральної позиції коптер при польоті постійно контролює свої координати і в разі повернення стіків в нейтральну позицію коптер відразу зупиняється. При цьому режимі коптер мало динамічний, підходить для великих коптерів.

Max. navigato in speed – це максимальна швидкість в режимі навігації в см/с (встановлений режим NAV POSHOLD).

Max. CRUISE speed – максимальна швидкість в режимі круїзу в см/с.

Max. navigator climb rate – максимальна швидкість підйому в режимі навігації в см/с.

Max. ALTHOLD climb rate – максимальна швидкість підйому в режимі утримання висоти в см/с.

Multicopter max. banking angle [degrees] – максимальний кут нахилу коптера в градусах в режимі навігації.

Use mid. throttle for ALTHOLD – Якщо включений, режим утримання висоти встановлений, коли стик газу знаходиться в середньому положенні.

Hover throttle – У цьому вікні вказується число, пропорційне частоті обертання моторів при середньому стике газу. Якщо в середньому стике газу на пульті встановити режим утримання висота і коптер буде різко набирати висоту або знижуватися, необхідно точніше встановити це число.

Розділ RTH and Landing Settings.

RTH altitude mode:

Current – повернення додому (в точку старту) виконується на тій же висоті на якій було втрачено зв'язок з пультом управління або дана команда повернення.

Extra – при поверненні коптер з поточної висоти підніметься на висоту, зазначену в параметрі RTH

altitude.

Fixed – при поверненні, якщо коптер має висоту спрацьовування повернення додому нижче RTH altitude, то він піднімається на висоту повернення і далі на ній летить додому. Якщо коптер був вище висоти повернення, то по всій зворотній траєкторії він повільно опускається до висоти повернення додому.

Мах – коптер повертається в точку старту на максимальній висоті, яку він зафіксував під час польоту. В цьому випадку, якщо коптер перелітав гору, а потім знижувався, він при зворотному поверненні не зіткнеться з горою.

At least – повертається в точку старту на висоті не менше тієї, що вказана в параметрі RTH altitude. Якщо висота коптера була менше RTH altitude при спрацьовуванні RTH, то він піднімається на висоту повернення. Якщо більше, то повертається на цій же висоті.

RTH altitude – висота повернення додому в см.

Climb before RTH – спочатку піднятися до висоти RTH altitude, потім повернутися в точку старту.

Climb regardless of positions sensors health – піднятися незалежно від датчика, який втратив зв'язок із супутниками. Якщо зв'язок не відновитися на висоті, коптер приземлиться в цьому місці.

Tail first – повернення додому задом без розвороту.

Land after RTH - Always – завжди виконувати посадку в точці старту, Never – не виконувати посадку в точку старту, Only failsafe – виконувати посадку в разі втрати зв'язку з передавачем.

Landing vertical speed – вертикальна швидкість посадки.

Min. vertical landing speed at altitude – висота, на якій вертикальна швидкість посадки сповільнюється.

Vertical landing speed slowdown at altitude – висота, починаючи з якої коптер починає пригальмовувати вертикальну швидкість посадки.

Min. RTH distance – мінімальна відстань, починаючи з якого коптер буде виконувати процедуру повернення додому. Якщо відстань менше і зв'язок з апаратурою управління порушиться, коптер виконає посадку в місці обриву зв'язку.

Розглянемо можливості польотного контролера і прошивки INAV щодо налаштування PID регулятора. Відомо, що PID регулятор (Пропорційно інтегрально диференційне регулятор) це керуючий цикл зі зворотним зв'язком, який дуже часто використовується в різних керуючих системах. PID регулятор обчислює значення «помилки» як різницю між вимірним значенням змінної і її бажаним значенням. Він намагається мінімізувати помилку впливаючи на керовані входи.

PID регулятор бере дані, виміряні сенсорами польотного контролера (гіроскопи, акселерометри) і порівнює їх з очікуваним значеннями, щоб змінити швидкість моторів для компенсації будь-яких відхилень і утримання балансу. Алгоритм обчислень в PID регуляторі включає в себе 3 постійних параметра – пропорційне, інтегральне і диференціальне значення, що позначаються P, I і D. Евристичне ці значення можуть бути інтерпретовані як значення в часі: P залежить від поточної помилки, I – від накопичених минулих помилок, D – це передбачення майбутніх помилок, на підставі швидкості зміни. Залежно від польотного контролера PID регулятори будуть пов'язані з різними польотними режимами.

P – це основне значення, яке визначає стабільність. Наприклад, якщо I і D будуть рівними 0, літак буде утримувати горизонтальне положення. Тому значення P налаштовується до значень I і D. Чим більше значення P, то все більше воно намагається стабілізувати коптер. Але якщо P занадто велике, то коптер стає занадто чутливим і дуже різко намагається коригувати своє становище, проскакуючи необхідне положення (надмірно різка і швидка реакція), в цьому випадку виникнуть коливання з великою частотою. Параметр P збільшують до тих пір поки не з'являться високочастотні коливання, звуки яких легко можна розрізнити. Далі P зменшують приблизно на 10–15%.

D – це протилежність P. При різкому відхиленні стіків по крену і тангажу при малих D коптер починає розгойдуватися, що призводить до його перекидання. В цьому випадку підвищують D так, щоб при різкому відхиленні стіків і поверненні їх в нейтральне положення коптер повертався в горизонтальне положення без коливань. Значення I збільшують до тих пір, поки не з'являться низькочастотні коливання коптера. Після цього I зменшують до повного припинення коливань. Значення I зменшує розгойдування коптера під час швидкого зниження.

Розглянемо налаштування INAV для зміни параметрів P, I, D під час польоту. Для цього використовується вкладка Adjustments. На пульті управління необхідно вибрати два канали – це трьохпозиційний перемикач і "крутилка" – канал, пов'язаний зі змінним резистором, який може плавно змінювати значення імпульсів від 1000 до 2000. Зміна значень параметрів виконується за допомогою трьохпозиційного перемикача. Середнє положення відповідає стану, коли параметр не змінюється. Верхнє положення – зменшення параметра. Нижнє – збільшення. До польотного контролера обов'язково повинен бути підключений зумер. При зменшенні параметра на одну одиницю він дає одноразовий сигнал з періодом приблизно 0.5сек. При збільшенні – подвійний сигнал. Наприклад, п'ять сигналів, – параметр від початкового значення зменшився на 5 одиниць і т.д. Для вибору параметра використовується канал з резистором. Якщо поворот резистора розмітити на 3 однакових частини, то можна міняти три параметра, встановивши резистори в певне положення. Рисунок 7 ілюструє сказане.

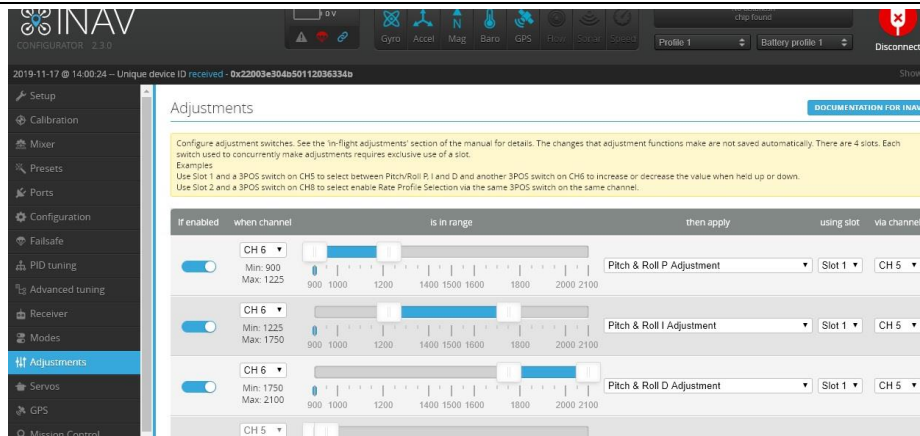


Рис. 7. Ілюстрація роботи з вкладкою Adjustments для установки параметрів PID-регулятора

Канал CH6 використовує змінний резистор. На каналі CH5 встановлений трьохпозиційний перемикач. Якщо ручка резистора (CH6) знаходиться в лівому положенні, то трьохпозиційний перемикач змінює параметр P по Pitch і Roll одночасно. При середньому положенні ручки резистора одночасно змінюються значення параметра I також по Pitch і Roll одночасно. В крайньому правому – D. Одночасне зміна можлива, так як коптер симетричний з центром тяжкості в центрі. Так будуть змінюватися PID параметри P, I, D, по Roll, Pitch, представлені в таблиці на рис 4. Щоб побачити ці зміни необхідно натиснути на кнопку refresh в вкладці PID tuning це в разі, якщо комп'ютер підключений до польотного контролера. При натисканні на кнопку save нові параметри будуть збережені. Під час польоту для збереження змінених параметрів PID необхідно на пульті управління опустити вниз і розвести в різні боки стіки пульта управління (рис.6). Сигнал зумера вкаже, що значення PID регулятора записані в EEPROM пам'ять контролера. Для такого регулювання параметрів необхідно мати мінімум 8-канальну систему управління. Аналогічно можна змінювати багато параметрів польотного контролера, які можна вибрати в колонці then apply вкладки Adjustments. Чим більше каналів має система управління, тим більша кількість параметрів регулюється в тестових польотах по налаштування будь-якого БПЛА. На рис. 8 показана настройка для зміни параметрів Pos XY P Adjustment, Vel XY P Adjustment, Vel XY D Adjustment, які дуже важливі для забезпечення плавного польоту коптера в режимі навігації (NAV POSTHOLD, NAV RTH) і по подорожнім точкам (NAV WP).

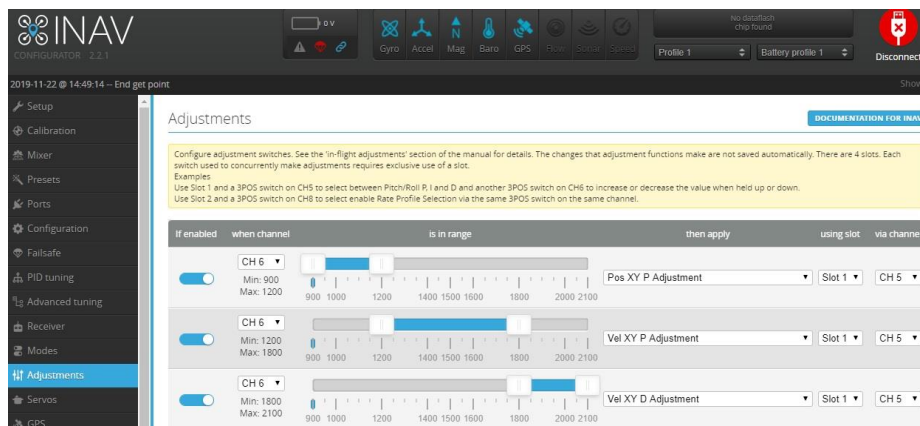


Рис. 8. Налаштування параметрів для режиму навігації

Експериментально встановлено, що одним з важливих параметрів режиму навігації є Position XY - P (рис. 4 обведений). Наприклад, якщо його зменшити від встановлених за замовчуванням, то в режимі Cruise коптер літає дуже плавно, але довго шукає шляхову точку, наприклад при поверненні в точку старту. Коптер може зависнути на кілька десятків секунд, хоча при великому значенні параметра точка визначається відразу і коптер знижується. Аналогічно і при польоті по точкам. Кожна точка визначається довго і коптер висить над нею кілька десятків секунд. Збільшення радіусу розпізнавання точки параметром nav\_wp\_radius поведінку коптера не змінює. Занадто велике значення Position XY - P – поведінка коптера ставати різким і нестійким. Висновком є те, що важко передбачити поведінку коптера при зміні тільки одного параметра. Складність настройки в тому, що необхідно міняти кілька параметрів для досягнення стійкості польоту. І не завжди це вдається. Налаштування по навігаційним PID-ам плавного польоту коптера в режимі Cruise (і в навігаційних режимах) є тривалою і не завжди успішною.

При установці навігаційного обладнання на коптер, армінг коптера можна виконає тільки в разі підключення до нього такої кількості супутників, які вказані у вкладці Advanced tuning в параметрі Min. GPS satellites for a valid fix, наприклад 6 супутників. Для вирішення армінга без супутників використовується

команда `set nav_extra_arming_safety = OFF`, яку вводять в вкладці CLI з подальшим введенням команди `save`. На рис. 9 представлено фото експериментального БПЛА. Компас винесено за межі корпусу GPS приймача для зменшення збоїв його роботи, помилок по шині I2C і зависання.



Рис. 9. Фото експериментального коптера

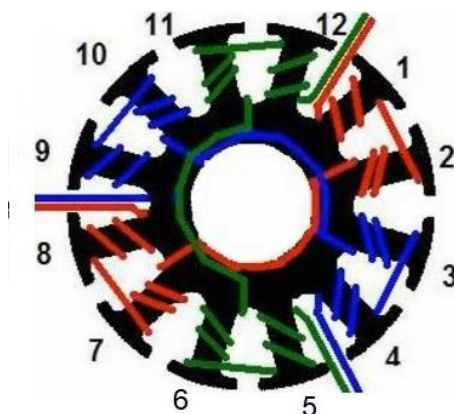


Рис. 10. Схема намотування трикутником (дельта)

Встановлено при запусках коптера, що його PID регулятори дуже чутливі до ESC регуляторам і моторам. Наприклад, установка ESC регуляторів, побудованих на різній елементній базі, але з однаковим струмом віддачі – 30A і однаковою прошивкою – Simonk, показало, що при різкому збільшенні газу, коптер перевертається по Roll і трохи по Pitch. При плавному збільшенні газу коптер піднімається стійко. На рис. 10 показана намотування (перемотування) моторів, якщо вони не будуть розвивати задану потужність для забезпечення сталого польоту при динамічному управлінні (Мотор A2212/1000. На статорі 14 магнітів, на роторі 12 полюсів. Обмотка на полюсі – 13 витків).

### Висновки

1. Показана можливість зміни параметрів PID регулятора під час польоту за допомогою пульта управління для прошивки INAV.
2. Для малих оборотів моторів показана можливість використання режиму AIR MODE для збільшення ефективності роботи PID регулятора при нульовій дросельній заслінки.
3. Досліджено можливість використання прошивки INAV з польотним контролером OMNIBUSF4V3 починаючи з версії 1.9.2 для польоту по заданій траєкторії, яку можна сформувати максимум з 60 шляхових точок.
4. Розглянуто підключення до польотного контролера магнітометра, GPS приймача, моторів, радіоприймача системи управління для побудови бюджетного (до \$ 100) повністю автоматичного квадрокоптера для виконання фото зйомок місцевості по радіусу до 10км. з літій іонними елементами ємністю 6000мАч.
5. Експериментально показана можливість стабілізації кута тангажу при використанні режиму Anti-Гравіті
6. Встановлено, що PID регулятори дуже чутливі до ESC регуляторам і моторам. Наприклад, установка ESC регуляторів, побудованих на різній елементній базі, але з однаковим струмом віддачі – 30A і однаковою прошивкою – Simonk, показало, що при різкому збільшенні газу, коптер перевертається по Roll і трохи по Pitch.
7. Експериментально встановлено, що одним з важливих параметрів режиму навігації є Position XY - P. Наприклад, якщо його зменшити від встановлених за замовчуванням, то в режимі Cruise коптер літає дуже плавно, але довго шукає шляхову точку, що призводить до різкого збільшення часу польоту. Збільшення цього параметра призводить до різкого і нестійкого польоту.
8. Встановлено неможливість настройки магнітометра HMC5883L для забезпечення прямолінійного польоту коптера в режимі Cruise. Так при установки на північ з кутом 0 градусів і подальшим його розворотом на 180 градусів, програмне забезпечення INAV інтерпретує поворот не на 180, а на 191 градус.

### Література

1. Мясичев А.А. Возможности полетного контроллера CC3D с прошивкой INAV / А.А. Мясичев // Вісник Хмельницького національного університету. 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. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>.

4. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md>.
5. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>.
6. U-center Windows. GNSS evaluation software for Windows [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://www.u-blox.com/en/product/u-center-windows>.
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. OMNIBUS F4V3 [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : [http://nic.vajn.icu/PDF/radio-controlled/OMNIBUS\\_F4\\_V3.pdf](http://nic.vajn.icu/PDF/radio-controlled/OMNIBUS_F4_V3.pdf)
9. М'ясищев А.А. Программирование ESC регуляторов SIMONK-30A и EMAX SIMON-12A через ARDUINO и полетный контроллер / А.А. М'ясищев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – № 2. – С. 228–237.
10. INAV Configurator 2.2.1 [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/2.2.1>
11. Карпов В.Э. ПИД-управление в нестрогом изложении [Electronic resource]. – Москва, 2012. – Mode of access : [http://robobob.ru/materials/articles/pages/Karpov\\_mobline1.pdf](http://robobob.ru/materials/articles/pages/Karpov_mobline1.pdf)
12. QUADCOPTER PID EXPLAINED [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://oscarliang.com/quadcopter-pid-explained-tuning/>
13. Open-Source flight controller software for modern flight boards [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <http://cleanflight.com/>.
14. М'ясищев А.А. Построение БПЛА на базе полетного контроллера APM 2.6 / А.А. М'ясищев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2016. – № 5. – С. 225–230.
15. М'ясищев А.А. Программирование ESC регуляторов прошивками SIMONK и BLHELI через ARDUINO и полетный контроллер [Electronic resource]. – Mode of access : [https://www.researchgate.net/publication/332381105\\_PROGRAMMIROVANIE\\_ESC\\_REGULATOROV\\_PROSIVKAMI\\_SIMONK\\_I\\_BLHELI\\_CEREZ\\_ARDUINO\\_I\\_POLETNYJ\\_KONTROLLER](https://www.researchgate.net/publication/332381105_PROGRAMMIROVANIE_ESC_REGULATOROV_PROSIVKAMI_SIMONK_I_BLHELI_CEREZ_ARDUINO_I_POLETNYJ_KONTROLLER), 2019

#### References

1. Myasishev A.A. Vozmozhnosti poletnogo kontrollera SS3D s proshivkoj INAV / A.A. Myasishev // Herald of Khmelnytskyi National University. – Hmelnyckij : HNU, 2019. – № 1. – S. 129–136.
2. Myasishev A.A. Ispolzovanie platy ROBOTDYN MEGA2560 PRO dlya postroeniya poletnogo kontrollera geksakoptera / A.A. Myasishev // Herald of Khmelnytskyi National University. – Hmelnyckij : HNU, 2018. – № 3. – S. 171–179.
3. FLASHER-STM32 [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://www.st.com/en/development-tools/flasher-stm32.html>.
4. Command Line Interface (CLI) [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/blob/master/docs/Cli.md>.
5. INAV [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav/wiki>.
6. U-center Windows. GNSS evaluation software for Windows [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <https://www.u-blox.com/en/product/u-center-windows>.
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. OMNIBUS F4V3 [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : [http://nic.vajn.icu/PDF/radio-controlled/OMNIBUS\\_F4\\_V3.pdf](http://nic.vajn.icu/PDF/radio-controlled/OMNIBUS_F4_V3.pdf)
9. Myasishev A.A. Programirovanie ESC reguljatorov SIMONK-30A i EMAX SIMON-12A cherez ARDUINO i poletnyj kontroller / A.A. Myasishev // Herald of Khmelnytskyi National University. – Hmelnyckij : HNU, 2019. – № 2. – S. 228–237.
10. INAV Configurator 2.2.1 [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://github.com/iNavFlight/inav-configurator/releases/tag/2.2.1>
11. Karpov V.E. PID-upravlenie v nestrogom izlozhenii [Electronic resource]. – Moskva, 2012. – Mode of access : [http://robobob.ru/materials/articles/pages/Karpov\\_mobline1.pdf](http://robobob.ru/materials/articles/pages/Karpov_mobline1.pdf)
12. QUADCOPTER PID EXPLAINED [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access : <https://oscarliang.com/quadcopter-pid-explained-tuning/>
13. Open-Source flight controller software for modern flight boards [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <http://cleanflight.com/>.
14. Myasishev A.A. Postroenie BPLA na baze poletnogo kontrollera APM 2.6 / A.A. Myasishev // Herald of Khmelnytskyi National University. – Hmelnyckij : HNU, 2016. – № 5. – S. 225–230.
15. Myasishev A.A. Programirovanie ESC reguljatorov proshivkami SIMONK i BLHELI cherez ARDUINO i poletnyj kontroller [Electronic resource]. – Mode of access : [https://www.researchgate.net/publication/332381105\\_PROGRAMMIROVANIE\\_ESC\\_REGULATOROV\\_PROSIVKAMI\\_SIMONK\\_I\\_BLHELI\\_CEREZ\\_ARDUINO\\_I\\_POLETNYJ\\_KONTROLLER](https://www.researchgate.net/publication/332381105_PROGRAMMIROVANIE_ESC_REGULATOROV_PROSIVKAMI_SIMONK_I_BLHELI_CEREZ_ARDUINO_I_POLETNYJ_KONTROLLER), 2019

Рецензія/Peer review : 9.5.2020 р. Надрукована/Printed : 16.6.2020 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією