

# Дипломна работа

---

КАТЕДРА СИСТЕМИ И УПРАВЛЕНИЕ

---

НА ТЕМА:

## Платформа за безпилотен летателен апарат с четири ротора

*Автор:*

РАФАЕЛ КАЛЪЧЕВ,  
IV курс, № 011217071

*Ръководител:*

гл. ас. д-р Александър Хотмар

*Ръководител на кат. СУ:*

доц. д-р Теофана Пулева

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ  
СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ АВТОМАТИКА  
АИУТ



АПРИЛ, 2021

СОФИЯ

# Съдържание

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Въведение</b>                                                   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Използвана среда и инструменти за разработка на платформата</b> | <b>3</b>  |
| 2.1      | Среда за разработка на софтуера . . . . .                          | 3         |
| <b>3</b> | <b>Инструменти</b>                                                 | <b>4</b>  |
| 3.0.1    | Логически анализатор и генератор на (дигитални) сигнали . . . . .  | 4         |
| 3.0.2    | Балансьор за витла . . . . .                                       | 5         |
| 3.0.3    | 3D Принтер . . . . .                                               | 6         |
| <b>4</b> | <b>Използван хардуер</b>                                           | <b>7</b>  |
| 4.1      | Микроконтролер . . . . .                                           | 7         |
| 4.1.1    | Характеристики . . . . .                                           | 8         |
| 4.1.2    | Комплект 32F429IDISCOVERY . . . . .                                | 8         |
| 4.2      | Жироскоп и Акселерометър . . . . .                                 | 8         |
| 4.3      | Магнитометър . . . . .                                             | 9         |
| <b>5</b> | <b>Архитектура на системата</b>                                    | <b>9</b>  |
| 5.1      | Конструкция на платформата . . . . .                               | 9         |
| 5.2      | Платформа с 4 ротора . . . . .                                     | 9         |
| 5.3      | Платформа за управление на ъгъл на завъртане . . . . .             | 10        |
| <b>6</b> | <b>Изграждане на системата и решени проблеми</b>                   | <b>11</b> |
| 6.1      | Моделиране . . . . .                                               | 11        |
| <b>7</b> | <b>Предложения за надграждане</b>                                  | <b>11</b> |
| <b>8</b> | <b>Литература</b>                                                  | <b>11</b> |
| <b>9</b> | <b>Приложения</b>                                                  | <b>12</b> |

## Списък на фигурите

|   |                                                            |    |
|---|------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Логически анализатор SQ50 . . . . .                        | 5  |
| 2 | Прозорец Scana Studio . . . . .                            | 5  |
| 3 | Балансьор за витла . . . . .                               | 6  |
| 4 | 3D принтер Creality Ender 3 V2 . . . . .                   | 6  |
| 5 | Прозорец на Ultimaker Cura . . . . .                       | 7  |
| 6 | Прозорец на FreeCad . . . . .                              | 7  |
| 7 | Конструкция на Платформата с 4 ротора . . . . .            | 10 |
| 8 | Конструкция на платформата за управление на ъгъл . . . . . | 10 |

## Списък на таблиците

## 1 Въведение

Този труд се концентрира върху цялостното изграждане на система за управление като предоставя за пример изграждане на "Безпилотна платформа за летателен апарат с четири ротора". Основните неща на които ще бъде наблеганто е изграждането на софтуера от основи за безпилотният летателен апарат. По този начин ще бъде демонстрирано как може да се изгради основа за софтуер за управление на непознат, иновативен контролер, за който не съществуват библиотеки. Целта е да се елиминира интеграцията с матлаб и да се постигне по-добро разбиране на софтуера на системата за управление и това как той работи и работата само с специфични много популярни модули, за които има безброй библиотеки. Ще бъде разгледан начин за инициализиране и управление на периферията, както методи за обработка на данните поступащи от периферията за сформирание на управляващи въздействия.

Избраната система е многомерна и има състояния, които не могат да бъдат измервани директно. Този труд ще демонстрира изграждането на наблюдателя на състоянията на системата, както и неговата имплементация като част от алгоритъма за управление.

Ще разгледаме и т.нар композитна архитектура за да си позволим лесна промяна и конфигурация на софтуера за управление.

Този труд няма да разглежда изграждането на система за управление с помощта на Операционна система за реално време. Изграждането на ОС за реално време ще бъде плът на отделен бъдещ труд. Работата в реално време ще бъде осигурена от софтуера на контролера, но тя няма да бъде разпреселена на отделни "задачи" а ще се управлява от регулярните прекъсвания на раймера съпътствани от проста логика и функции имплементирани по начин, който ще гарантира изпълнение за определеното време.

Ще разгледаме отделните инженерни решения взети по време на работата по проекта и причините довели до тях.

## 2 Използвана среда и инструменти за разработка на платформата

### 2.1 Среда за разработка на софтуера

Изградената среда за разработка на софтуера е конфигурируема и поддържа базата микроконтролери от семейство *STM32M4xxx*. Като основа е използвана автоматичната система за изграждане *GNU make*, която позволява насочена обработка на файловете изграждащи софтуера и документацията, с цел намаляване времето за обработка. *GNU make* свързва всички елементи от средата и последователно изпълнява само нужните команди с цел намаляване на използваните ресурси. Интерфейсът е команден, което позволява допълнителни нива на автоматизиране на процесите по разработка.

За компилация е използван свободният компилатор на *GNU GCC (GNU Compiler Collection)*

*ARM NON-EABI (No Embedded-Application Binary Interface)*. Тази разновидност на компилатора е неспецифична към операционна система, което е нужно, тъй като разработваният софтуер няма да работи под операционна система. Тази разновидност на компилатора също е неспецифична към производител на процесора. *GCC ARM NON-EABI* Е колекция от свързани инструменти, за разработка на софтуер за системи с ядро *ARM*. Състои се от компилатор на езика *C*, асемблатор, линкер, инструменти за преглед и конверсия между стандартни формати двоични файлове.

За връзка с контролера е използван командният пакет за *ST-LINK* на *STMicroelectronics*. Пакетът предоставя команди за връзка с програматорът *ST-LINK V2*, чрез който се програмира микроконтролета. Пакетът се използва също за управление на портът за дебъг, през който се осъществява дебъг комуникацията.

Като дебъгер е използван свободният дебъгер на *GNU GDB*. Той може да се използва както за локално така и за отдалечено дебъгване. Тъй като микроконтролера е отдалечен използваме командният пакет за *ST-LINK* да конфигурираме порт за дебъг, към който се свързваме чрез *GDB*.

За писането на софтуера е използван терминалният текстов редактор *VIM* поради удобният си команден интерфейс. За генериране на всички софтуерни тагове, които *VIM* ще използва за подпомагане на процеса за разработка е използван софтуера *ctags*, който обработва релевантните файлове и поддържа опростена база данни за всички индентификатори, имена и тагове, които *VIM* използва спрямо контекста.

Основата за средата за разработка съм публикувал в публично хранилище на GitHub [7].

## 3 Инструменти

За хардуерната част са използвани стандартни инструменти, като отвертки, шестограми, винтоверт, нивелир, макетен нож, рулетка, шублер, трион, шкурка, поялник, пистолет за топъл силикон и т.н.

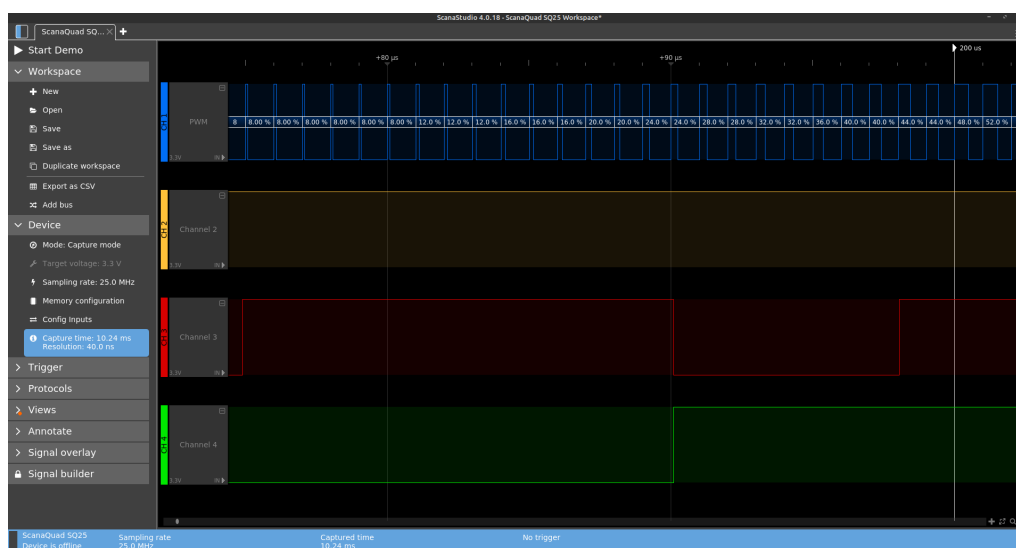
### 3.0.1 Логически анализатор и генератор на (дигитални) сигнали

Тъй-като този труд има за цел управление и работа с хардуер и създаване на хардуерни драйвери, е нужен начин за анализ и диагностика на крайната комуникация. Затова е избран модулът *SQ50 - logic analyzer* от семейство *SQ series (ScanaQuad)* на *IKALOGIC S.A.S.* (Фигура 1). Модулът разполага с 4 канала с възможност за използване за вход и или изход, максимална честота на дискретизация  $50\text{MHz}$ , максимална честота на измерим/генерируем дигитален сигнал  $12\text{MHz}$ , входно напрежение  $\pm 5\text{V}$ , входен импеданс  $1\text{M}\Omega/4\text{pF}$ , конфигурируем изходен драйвър (Push-Pull/open-drain), и максимален изходен ток  $20\text{mA}$  [6].



Фигура 1: Логически анализатор SQ50

*SQ50 - logic analyzer* е използван със софтуерният продукт *ScanaStudio* (Фигура 2) на *IKALOGIC S.A.S.* *ScanaStudio* е достъпен за платформите *Windows 7, 8 и 10, LINUX UBUNTU 16.04 и по-нови (x64), MACOS 10.9 и по-нови*. Софтуерният продукт, позволява възможности за конфигурация на хардуера от семейство *SQ series (ScanaQuad)*, както и четене, експорт и представяне на данните постъпили от модула. Към продукта *IKALOGIC S.A.S.* предоставят набор от готови разширения, които са свободно достъпни и позволяват: параметрично генериране на основни типове сигнали като (ШИМ, честотна модулация, I2C), декодиране за сигнали като (USART, I2C, I2S, SPI, PWM, SWD, 1-Wire и т.н.), конфигурируем източник на задействане (Trigger) при определени условия като (получена специфична последователност, логическа промяна, специфичен/случаен валиден кадър от комуникационен протокол и т.н.).



Фигура 2: Прозорец Scana Studio

### 3.0.2 Балансьор за витла

Използване е балансьор за витла (Фигура 3) с цела балансиране на витлата. Балансьорът сам по себе си е тънка прецизно изработена права ос с с тънка резба, в комбинация с

2 прецизно изработени конични гайки с успоредна на оста задна част, за да фиксират витлото успоредно спрямо оста, както и да центрират срезата на отвора.

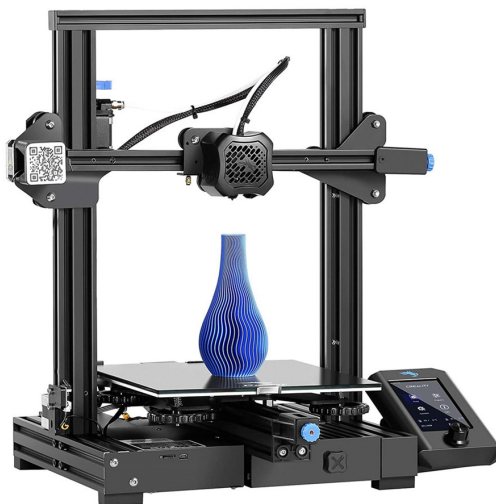


Фигура 3: Балансьор за витла

### 3.0.3 3D Принтер

За изработване на платформата е използван 3D принтера *Ender 3 V2* (Фигура 4) на *Creality*. Използва технология FFF (Fused Filament Fabrication) (производство чрез стопени нишки), което е формана адитивно производство. Принтера е оборудван с  $0.4mm$  дюза, легло с загревање и стъклена повърхност и има работен обем  $220 \times 220 \times 250mm$ , и диаметър на нишката  $1.75mm$  [9].

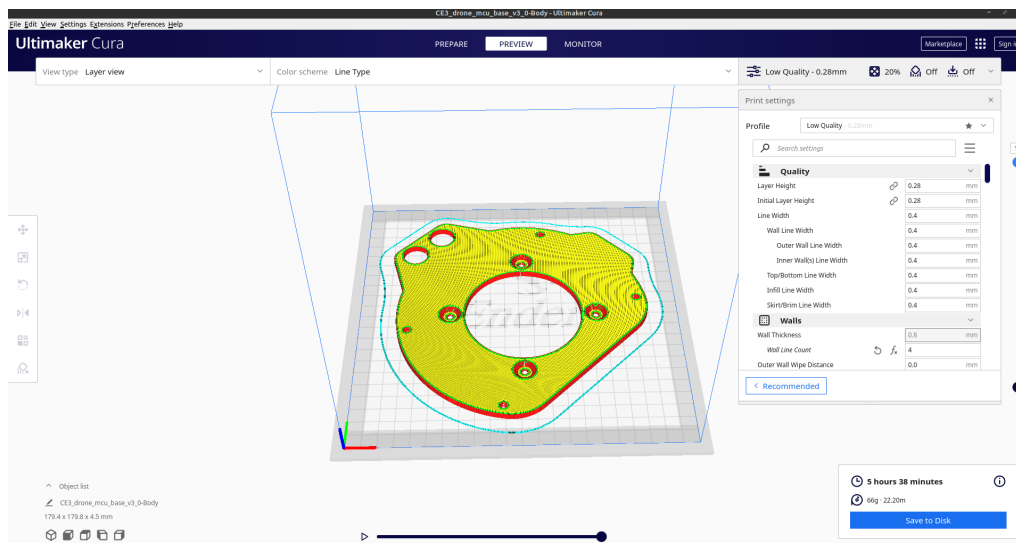
За целите на този труд е използвана нишка от ECO PLA (Рециклирана Полимлечна киселина) произведена от *3D Jake* с диаметър  $1.75mm$ , температура на принтиране  $195 \rightarrow 215^{\circ}C$ , максимална работна температура  $60^{\circ}C$ , якост на опън  $70MPa$ ) и деформация при опън 5% [1].



Фигура 4: 3D принтер Creality Ender 3 V2

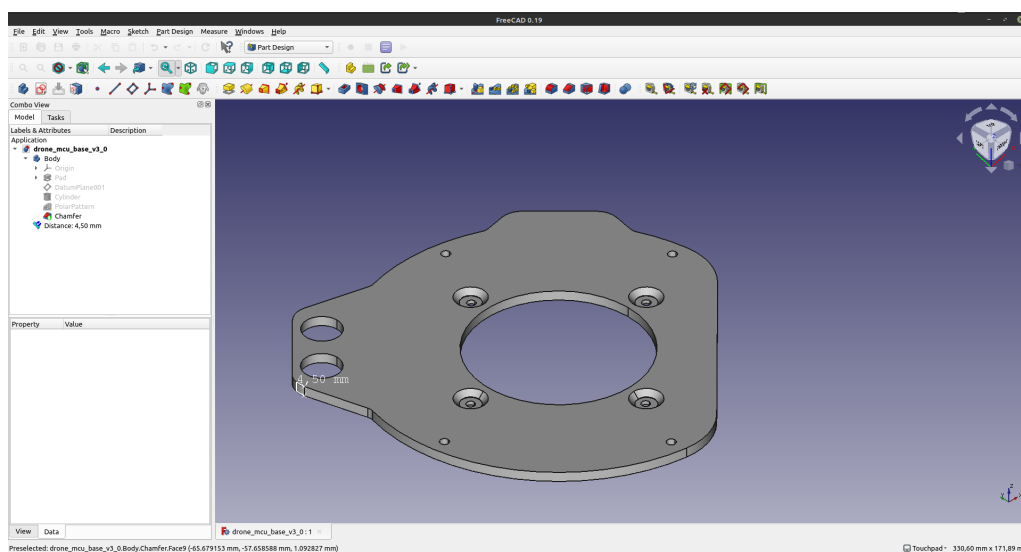
За генериране на G-code който ще бъде използван от принтера е използван софтуерният продукт *Ultimaker Cura* (Фигура 5) на *Ultimaker*. Продукта е конфигуриран точно за използваният 3D принтер *Ender 3 V2*, тъй като не по време на използване устройството не бе налично в базата данни с готови конфигурации. Софтуера позволява "нарязване" на 3-измерни обекти на слоеве и конвертиране то им в G-code програма, за изпълнение

от устройството. Софтуера позволява конфигуриране на множество параметри относно процеса на принтиране.



Фигура 5: Прозорец на Ultimaker Cura

За създаване на 3д модел е използван софтуерният продукт *FreeCad* **Фигура 6**, поради това, че работи под *Linux* Платформа и това че е добре документиран, свободен и безплатен софтуер.



Фигура 6: Прозорец на FreeCad

## 4 Използван хардуер

## 4.1 Микроконтролер

Микроконтролерът използван за проекта е с ядро с архитектура *ARM Cortex-M4*, произведен от *STMicroelectronics*. Модел *stm32f429ZIT6U*.



#### 4.1.1 Характеристики

В следният списък са поместени основните характеристики на микроконтролера [16].

- Ядро: *32b Arm Cortex-M4* с FPU
- Максимална честота на процесора: 180MHz
- Флаш Памет: 2048 Kbytes
- SRAM: Системна : 256 ( 112 + 16 + 64 + 64 ) Kbytes
- Таймери:
  - General Purpose: 10бр. () Add timers
  - Advanced control: 2бр. () Add timers
  - Basic: 2бр. () Add timers
- Цомуникационни интерфейси:
  - SPI/I2S : 6/2 (пълен дуплекс)
  - I2C: 3
  - USART/UART: 4/4
- GPIO: 114бр.
- Интерфейс за програмиране: *ST-LINK*
- Опаковка: LQFP144

#### 4.1.2 Комплект 32F429IDISCOVERY

Микроконтролерът е част от платка *32F429IDISCOVERY* (комплект за оценка на функционалностите на *STMicroelectronics*). Комплектът предоставя множество функционалности вградени в платката като 8MHz външен осцилатор, Вграден *ST-LINK* програматор, LCD Дисплей, 2бр. LED, както и удобна връзка към пиновете на микроконтролера в THT формат.

Важно нещо да се отбележи, е че в комплекта *32F429IDISCOVERY* има познат проблем с вграденият *ST-LINK* програматор, който докато USB не е свързано поддържа процесора в *RESET* през дебъгера.

### 4.2 Жироскоп и Акселерометър

Използван е чип *LSM6DS33* [14], който е интегрирано пакетно решение, предоставящо 3D дигитален Жироскоп и 3D дигитален акселерометър. Чипът използва  $1.7 \rightarrow 3.6V$  захранване като в нужния ни решим се нуждае от  $0.9mA$ . Чипът е част от сензорна платка, позволяваща директна връзка чрез протокол *I2C* (адрес: 0xD6).

За целите на настоящият ни проект е използвана следната конфигурация: Използва се директен достъп (без буфериране) до измерените стойности. Обхват на Акселерометъра  $\pm 8g$ , Обхват на Жироскопа  $\pm 500 dps$ .

#### 4.3 Магнитометър

### 5 Архитектура на системата

Архитектурната част на системата е организирана в три основни части:

Първата част се отнася до дизайна на платформата (физическото оформление), Основните концептуални идеи покрити в физическото оформление, разпределението на хардуера и това как този хардуер ще бъде използван за управлението. Как е свързана системата (хардуерно)

Част втора Архитектура на управлението (помисли за това)

Част трета разглежда софтуерната архитектура на управляващото устройство.

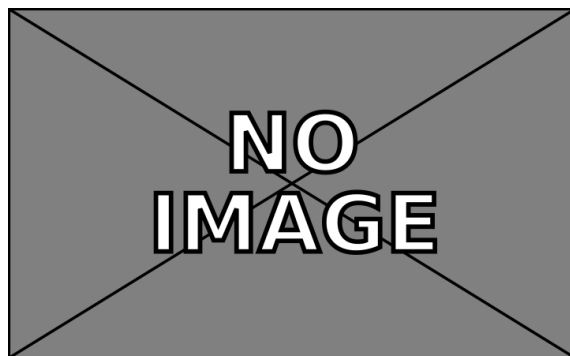
[15]

#### 5.1 Конструкция на платформата

#### 5.2 Платформа с 4 ротора

Платформата **Фигура 7** е конструирана от 2 метални П образни профила сключващи прав ъгъл помежду си, имащи пресечна точка в средата. Във края на профилите се намира по един Безчетков Постояннотоков мотор (без обратна връзка). Перките са свързани директно (без трансмисия) за въртящата ос на моторите. Батерията и контролният модул са позиционирани в средата на платформата. Батерията е позиционирана под пресечната точка на профилите. Управляващото устройство е позиционирано над пресечната точка на профилите, върху изработена, като част от проекта платформа.

При организиране на хардуера в платформата по този начин центърът на тежестта лежи под пресечната точка на профилите.

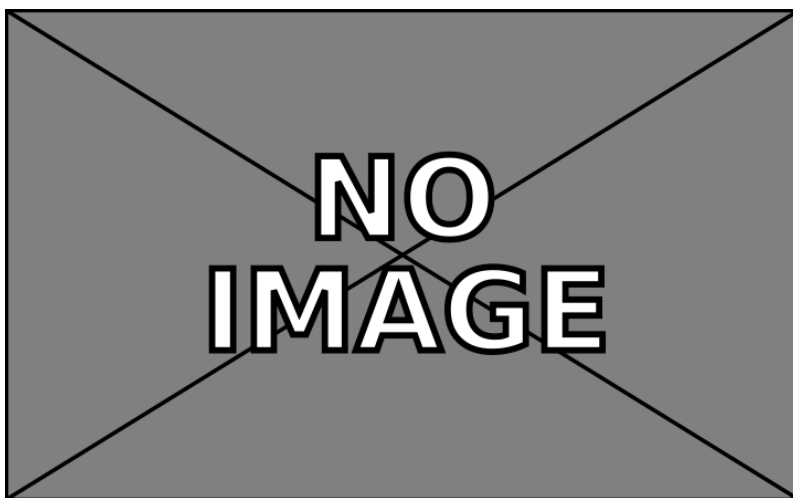


Фигура 7: Конструкция на Платформата с 4 ротора

### 5.3 Платформа за управление на ъгъл на завъртане

Платформата за управление на ъгъл на завъртане има за цел да ни позволи лесно и безаварийно да изпробваме алгоритмите за управление на ъгъл на завъртане.

Платформата **Фигура 8** е изградена от дърво. Състои се от Т образна основа с ограничители и въртяща част. Основата е висока 30cm и е съставена от 2 правоъгълни дървени профил(30x10x2.5cm) съединени с винтове. Ограничителите ограничават максималният ъгъл, който въртящата част може да сключва с хоризонта в диапазона ( $\pm 40^\circ$ ). Оста на въртене представлява М8 болт. Оста образува болтово съединение с основата, както и с лагерите на въртящата част. Въртящата част е съставена от правоъгълен дървен профил (60x2.5x3cm), с вложени 2 лагера (сачмен с дълбок канал 8x22mm, максимално статично натоварване 138kg [8]), като са пробити отвори за болтово съединяване на основите за безчетковите постояннотокови мотори, както и отвори за болтово съединяване на основата на жирокопа и акселерометъра. Останалите нужни компоненти, като ESC (*Electronic Speed Controller*) за моторите са прикрепени към рамената на въртящата част използвайки кабелни превръзки (т.нар свински опашки), като е взето предвид балансиране на платформата, чрез разпределение на тежестта на допълнителните елементи.



Фигура 8: Конструкция на платформата за управление на ъгъл

## 6 Изграждане на системата и решени проблеми

### 6.1 Моделиране

## 7 Предложения за надграждане

## 8 Литература

- [1] 3D Jake, *Technical Data Sheet, 3DJAKE ecoPLA*, 3D Jake, 2018. url: [https://cdn-3d.niceshops.com/upload/file/Technical\\_Data\\_Sheet\[0\].pdf](https://cdn-3d.niceshops.com/upload/file/Technical_Data_Sheet[0].pdf).
- [2] ARM Limited, *ARM v7-M Architecture Reference Manual*, ARM, 2018. url: <https://developer.arm.com/documentation/ddi0403/ed>.
- [3] ARM Limited, *Cortex-M4 Technical Reference Manual (Revision r0p1)*, ARM, 2020. url: <https://developer.arm.com/documentation/100166/0001/>.
- [4] T. Bresciani, „Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter“, *MSc theses*, 2008.
- [5] GNU, *GCC Manual, Arm Options*, GNU, 2021. url: <https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/ARM-Options.html>.
- [6] IKALOGIC S.A.S., *SQ Series User Manual SQ25/SQ50/SQ100/SQ200 4 channels, 200 MSPS logic analyzer and pattern generator*, IKALOGIC S.A.S., -. url: <https://cdn.ikalogic.com/docs/ds/sq-series-manual-EN.pdf>.
- [7] R. Kalachev. (2022). GitHub User: Rafael Kalachev, url: [https://github.com/Rafael-Kalachev/thesis\\_stm32\\_base](https://github.com/Rafael-Kalachev/thesis_stm32_base) (дата на посещ. 12.02.2012).
- [8] Mechatronics Bearing Group, *608-2RS BEARING DATASHEET*, Mechatronics Bearing Group, -. url: <https://www.mechatronicsbearing.com/data-sheets/608-2RS-Extra-Small-Ball-Bearings.pdf>.
- [9] Sain samrt, *User Manual: CREALITY ENDER-3 V2 3D PRINTER*, Sain samrt, 2020. url: <https://m.media-amazon.com/images/I/B1f9eP6H3OS.pdf>.
- [10] J. Solà, „Quaternion kinematics for the error-state Kalman filter“, *техн. докл.*, 2017.
- [11] ST Microelectronics, *Errata sheet STM32F427/437 and STM32F429/439 line limitations*, ST Microelectronics, 2021. url: [https://www.st.com/resource/en/errata\\_sheet/es0206-stm32f427437-and-stm32f429439-line-limitations-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/errata_sheet/es0206-stm32f427437-and-stm32f429439-line-limitations-stmicroelectronics.pdf).
- [12] ST Microelectronics, *LIS3MDL Digital output magnetic sensor: ultra-low-power, high-performance 3-axis magnetometer*, ST Microelectronics, 2015. url: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3mdl.pdf>.
- [13] ST Microelectronics, *LPS25H MEMS pressure sensor: 260-1260 hPa absolute digital output barometer*, ST Microelectronics, 2014. url: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lps25h.pdf>.
- [14] ST Microelectronics, *LSM6DS33 iNEMO inertial module: accelerometer and 3D gyroscope*, ST Microelectronics, 2015. url: <https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/ARM-Options.html>.

- [15] ST Microelectronics, *RM0090 Reference manual STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced ARM-based 32-bit MCUs*, ST Microelectronics, 2020. url: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/dm00031020-stm32f405-415-stm32f407-417-stm32f427-437-and-stm32f429-439-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00031020-stm32f405-415-stm32f407-417-stm32f427-437-and-stm32f429-439-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf).
- [16] ST Microelectronics, *STM32F427xx STM32F429xx 32b Arm Cortex-M4 MCU+FPU, 225DMIPS, up to 2MB Flash/256+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 20 com. interfaces, camera and LCD-TFT*, ST Microelectronics, 2021.
- [17] ST Microelectronics, *UM1061 Description of STM32F2xx Standard Peripheral Library*, ST Microelectronics, 2011. url: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um1061-description-of-stm32f2xx-standard-peripheral-library-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1061-description-of-stm32f2xx-standard-peripheral-library-stmicroelectronics.pdf).
- [18] M. Watson, „The design and implementation of a robust ahrs for integration into a quadrotor platform“, *Meng electronic engineering, Department of electronic and electrical engineering*, 2013.

## 9 Приложения