



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО РОБОТИКА



Инж. Благовест Петров Христов

**Проектиране и управление на мултимерна
жиро-стабилизирана платформа за
видеозаснемане за безпилотни летателни
апарати**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд

за придобиване на образователната и научна степен

“Доктор”

Научна област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научната специалност: Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката

Научен ръководител: Доц. Д-р Мая Димитрова

София, 2019

Дисертантът заема длъжност „Инженер - индустриални машини и системи“ в Института по Роботика при Българската Академия на Науките - София. Работи в секция " Интерактивна роботика и системи за управление", гр.София.

Дисертационният труд се състои от увод, 5 глави, заключение, приноси и списък на използваната литература. Библиографската справка съдържа 111 заглавия, от които 2 на български език, 108 на английски и 1 адрес в интернет. Обемът на дисертацията е 162 страници. Изложението съдържа 89 фигури, чиито номера в автореферата съвпадат с тези в дисертацията. Номерацията на точките и подточките също съответства на тази от дисертационния труд. Приложенията са оформени на 38 страници, включващи софтуерни програми, различни перспективи на 3D модела и данни за печатната платка.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита съгласно изискванията на ЗРАС в РБ и Заповед № на Директора на ИР-БАН на заседание на Разширен секционен семинар на учените от секция ИРСУ, проведено на г. в гр. София.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на в зала 427 на ИР-БАН, ул. „Акад. Георги Бончев“.

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в канцеларията на ИР-БАН, на адрес: ул. “Акад.Георги Бончев”, блок 2, етаж 4.

Автор: инж. Благовест Петров Христов

Заглавие: Проектиране и управление на мултимерна жиро-стабилизирана платформа за видеозаснемане за БЛА

Тираж: 6 броя

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

С развитието на безпилотните летателни апарати (БЛА), в частност мултироторите, става все по-популярно използването им за различни задачи изискващи жиро стабилизирана платформа (гимбал). Една от тях е видеозаснемането. Основната цел на теза платформа е да стабилизира и позиционира товара като трябва да компенсира външните смущения, породени от вибрации в конструкцията и движението на БЛА. Масово практика е да се използват 3-осеви гимбали за тази цел, колкото и са осите на движение на БЛА. Възникват ситуации, при които те не могат да се справят с поставените има задачи достатъчно добре например размазване на изображението, изпускане на стабилизацията за части от секундата, цялостно изключване на гимбала поради претоварване на драйверите . Задачата на настоящата дисертация е да се проектира и създаде 5 осева жиро-стабилизирана платформа за малки БЛА, която до този момент е характерна за големи пилотни апарати (хеликоптери , самолети).

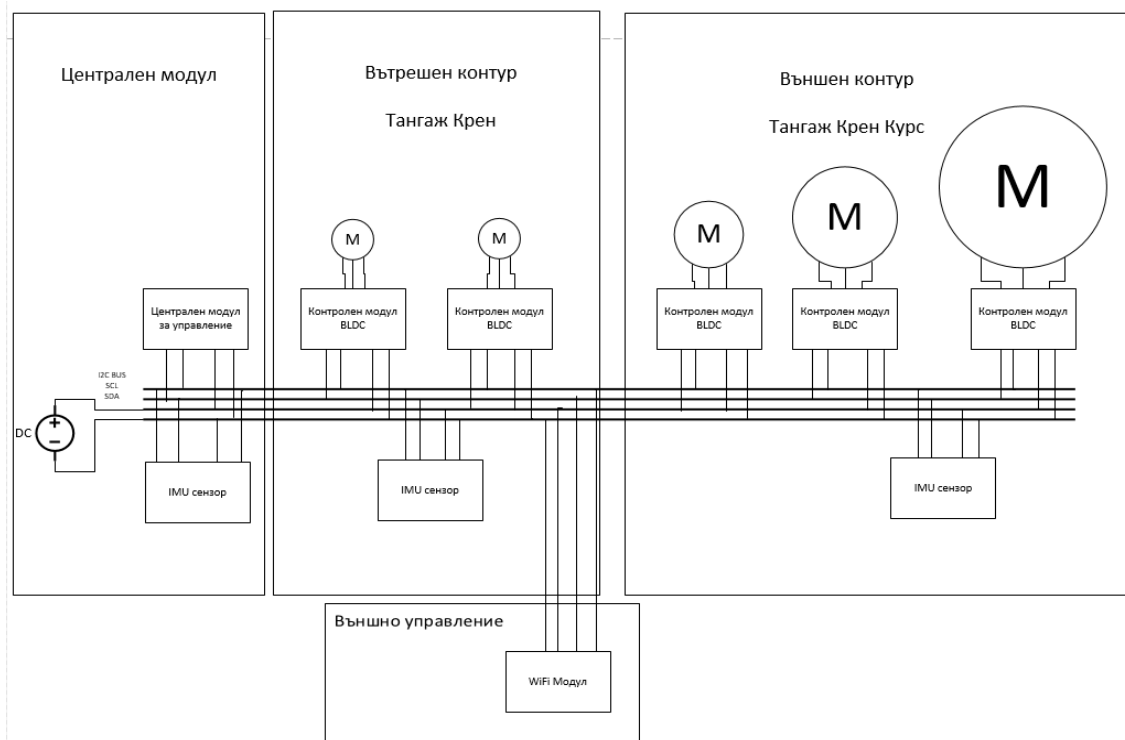
Цел и задачи на дисертационния труд

От направения обзор на съществуващите решения и похвати за стабилизиране на изображение могат да се отбележат някои нерешени в достатъчна степен досега проблеми.

Представени бяха съществуващите 5 и 6-осеви гимбали разширяващи възможностите на 2 и 3-осевите гимбали в използването им в лоши метеорологични условия, по-високи скорости на движение на БЛА и по-бързи маневри. Съществуващите решения са близки по размери с човешки ръст, но все още не са представени такива с размери подходящи за малки и средни БЛА. Проектирането на такъв тип гимбал се изразява в управлението на 5 електродвигателя стабилизиращи полезният товар и оптимизиране на размерите и масата на гимбала до минимални стойности. За всеки един мотор трябва да има модул за управление и до всеки мотор трябва да има минимум три броя проводници (6 и повече, в случай на ползване на външни датчици за управление). Това ще доведе до значителни проблеми в контролера и централния управляващ модул, свързани с брой изходи на контролера поддържащи PWM сигнали, адресация на IMU модулите (стандартно модулите имат две опции за адреси),

усложнено проектиране на печатната платка на контролера, повишена работна температура от допълнителни модули за моторите. От друга страна ще се увеличи многократно броят и дължината на проводниците до моторите и най-вътрешното IMU. Това ще доведе до възможност за смущения в сигналите, повишено тегло и усложнено сглобяване на конструкцията.

Решение на тези затруднения е да се създаде самостоятелен управляващ модул , получаващ и изпращащ команди по зададена шина и протокол (I2C). Този модул ще може да изпълнява функциите както на централен управляващ модул, така и на модул за управление на мотора и модул за събиране и обработване на данни от IMU модулите.



Фиг.1.11 Принципна схема на 5 осев гимбал със самостоятелни модули за управление

По този начин няма да има практическо значение колко стави/оси има нашият гимбал. Модулите ще могат да се използват и в други разработки имащи нужда от задвижване на мотори или работа с инерциален модул. Ще се намали общия брой проводници, обикалящ тялото на гимбала, до 4 броя при досегашен брой от 13.

От изключително важност са размерите и теглото на гimbала, за да може да се постигнат минимални стойности на тези параметри е необходимо да се разгледат в детайли всяка една съставна част и да бъде избрана оптималната такава.

Цел на дисертационния труд е да се проектира и да се предложи управление на многомерна жиро-стабилизирана платформа за видеозаснемане за безпилотни летателни апарати.

Можем да формираме следните **задачи**:

- **Да се предложи подход за проектиране на 5 осев гimbал на базата на анализ на съществуващите методи за контрол на безчеткови електродвигатели, отговарящи на условието за работа при ниски скорости и голяма прецизност ;**
- **Да се извърши сравнителен анализ на данни по схема, чрез използване на MEMS инерциални модули;**
- **Проектиране и изработка на многоцелеви модул, който може да изпълнява ролята, както на централен така и на модул за управление на безчетков електродвигател ;**
- **Да се разработи 3D модел на гimbал и да се конструира прототип чрез 3D принтиране;**
- **Провеждане на експериментални изследвания, с цел доказване на работоспособността на проектирания гimbал.**

Апробация на резултатите от дисертационния труд

Резултатите в дисертационния труд са докладвани на редовните семинари и заседания на секция „Интерактивна роботика и системи за управление“ и на ежегодните семинари на ИП – БАН. Също така са представени пред колегите от университета CEINE - Сантяго, Чили като част от проекта H2020-MSCA-RISE-2017 №777720 CybSPEED, в международната конференция “Robotics & Mechatronics and Social Implementations”- Варна 2018 и в конференция на САИ, “Automatics and Informatics” -2017г.

Научни публикации

Основните резултати от дисертационния труд са публикувани в 3 статии, издадени в периода 2017-2018 г. Те са докладвани на международни конференции и са издадени в томовете на тези конференции в пълен текст. И трите публикации са самостоятелни. Списък на публикациите е даден в края на автореферата.

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Дисертационният труд се състои от увод, 5 глави, заключение, приноси и списък на използваната литература. Библиографската справка съдържа 111 заглавия, от които 2 на български език, 108 на английски и 1 адрес в интернет. Обемът на дисертацията е 123 страници. Изложението съдържа 89 фигури, чиито номера в автореферата съвпадат с тези в дисертацията. Номерацията на точките и подточките също съответства на тази от дисертационния труд. Приложенията са оформени на 38 страници, включващи софтуерни програми, различни перспективи на 3D модела и данни за печатната платка.

1 Глава I. Съществуващи решения, основни компоненти, цели и задачи, материали и методи

В Глава 1 са представени видовете гимбали и основните компоненти на една жиро-стабилизирана система. Изяснени са характеристиките на всеки един елемент като са отбелязани стандартно използвани похвати и възможности за тяхното подобрене. Показани са причините поради, които се налага търсене на оптимизация и подобряване на характеристиките на стандартен гимбал както и са формулирани целите и задачите на дисертационния труд.

1.1 Въведение

С развитието на безпилотните летателни апарати (БЛА), и в частност мултироторите, става все по-популярно използването им за различни задачи, изискващи жиро стабилизирана платформа (гимбал). Една от тях е видеозаснемането. Основната цел на теза платформа е да стабилизира и позиционира товара като трябва да компенсира външните смущения породени от вибрации в конструкцията и движението на БЛА.

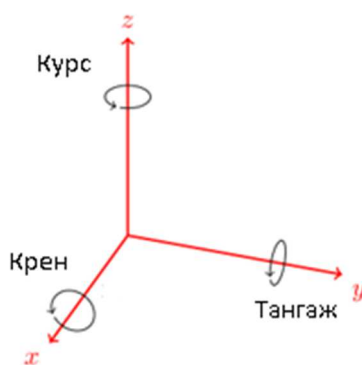
Масово практика е да се използват 3 осеви гимбали за тази цел, колкото и са осите на движение на БЛА. Възникват ситуации, при които те не могат да се справят с поставените им задачи достатъчно добре например размазване на изображението, изпускане на стабилизацията за части от секундата, цялостно изключване на гимбъла поради претоварване на драйверите .

Такива са случаите при силни пориви на вятъра ($>10\text{ м/с}$), заснемане на кадри с висока скорост ($>70\text{ км/ч}$), големи странични претоварвания при панорамни кадри, използване на големи и тежки телеобективи. Възможно решение на тези проблеми е да се използват по-мощни мотори, които са по-тромави и с по-голяма консумация на енергия. При тази ситуация е възможно моторите да не могат да реагират достатъчно бързо на високочестотни трептения и да се развали качеството на видеото. Това може да се избегне като се добавят още две оси, дублиращи тези на крен и тангаж (завъртане по ос Ox и Oy), с ъгъл на компенсация ± 5 градуса, които да използват по-малки мотори, способни да реагират по-бързо и съответно да се справят с вибрациите, пропуснати от основните оси.

1.2 Съществуващи решения

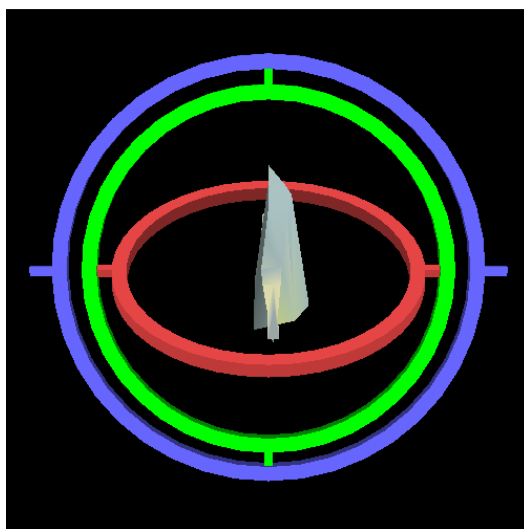
От увода разбрахме, че гимбалът стабилизира видеоизображение като компенсира завъртане по няколко оси. Това се постига чрез използването на сензори, отчитащи завъртането по всяка една ос (отделен сензор за всяка ос), и актюатори за всяка една ос. Сензорите подават данни към централен процесор, който ги обработва, отчита момента грешка от нулевото положение и подава сигнал към съответния актюатор, за да противодейства на тази грешка почти мигновено. В резултат камерата остава винаги нивелирана със земния хоризонт. [88-91, 93-96]

Гимбалите се различават по броя оси, които компенсират. Идеалният случай е три-осев гимбал, компенсиращ ъглите на курс, крен и тангаж (завъртане съответно по ос Oz , Ox и Oy).



Фиг.1.3 Оси на завъртане

В масовия случай тези три оси са напълно достатъчни, защото покриват всичките три равнини в пространството [97, 98], в който може да се завърти едно тяло. Въпреки това съществуват и дву-осеви гимбали (с по-ниска цена поради по-малкото компоненти), които имат стабилизация само по крен и тангаж. Също така съществуват 5 и 6 осеви гимбали с дублирани оси осигуряващи нови гледни точки и възможности за режисьорите и елиминиращи момента на „заклучване“ (gimbal lock) .



Фиг.1.4 Заклучване на осите (gimbal lock)

Заклучване на осите (gimbal lock) се наблюдава при 3 осевите гимбали и се изразява в губене на степен на свобода [1]. Това се получава когато две от осите застанат в паралелни равнини. Думата „заклучване“ е подвеждаща: нито една от осите не е заключена наистина. И трите равнини могат да се въртят свободно около съответните им оси на окачване. Независимо от това, поради паралелната ориентация на две от равнините на осите, няма налична равнина, в която да се осъществи завъртенето в различни равнини [2]. На фиг.1.4 зелената и синята равнина са станали паралелни. Ако завъртим която и да е от двете ще видим, че завъртането ще е около една и съща ос. В този момент червената равнина може да се върти свободно по втора ос. Така установихме, че при кое да е завъртане на трите равнини имаме само две степени на свобода.

1.3 Материали и методи

В рамките на дисертационния труд ще се използват предимно ардуино базирани развойни платки и среда за разработка (Ардуино Микро, Нано, Мера, Pololulo A-star Micro) и сензори MPU-6050 (акселерометър и жирокоп) и 9DOF Sensor stick (ADXL345 акселерометър, HMC5843 магнитометър, и ITG-3200 жирокоп) свързани чрез I2C шина. За управление на безчетковите двигатели са използвани интегрални схеми DRV8313.

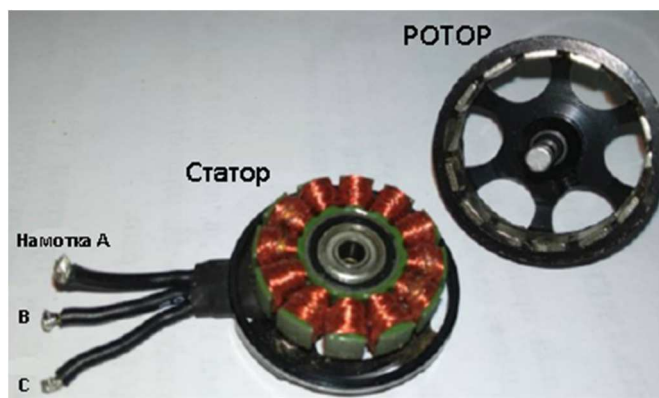
При създаване на прототипа на гimbала са използвани CAD софтуер Solidworks 2016 за проектиране на тялото и снемане на инерциални моменти и софтуер за проектиране на печатни платки Eagle PCB за проектиране на многоцелевия управляващ модул. Изработени са два прототипа - един използващ карбонови профили за изграждане на рамката, а другият изцяло 3D принтиран.

2 Глава II. Анализ на съществуващите методи за управление на безчетков електродвигател

В главата ще бъдат разгледани основните параметри на безчетков електродвигател и методика за определяне им спрямо конкретно зададено натоварване и условия. Представени са конструктивните особености и спецификата в управлението на работата им както и различни методи за контролиране на посока и скорост на движение. Избрани са два различни подхода за контрол и са съпоставени един спрямо друг чрез изграждане на опитна постановка.

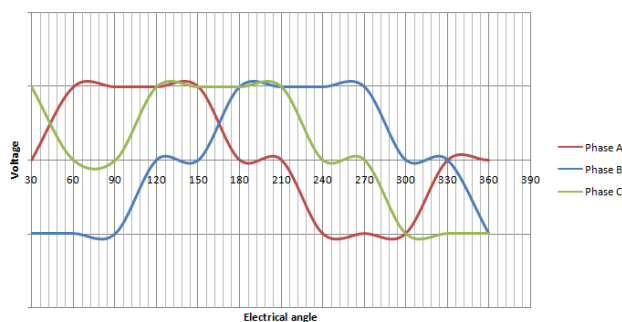
2.1 Начин на работа

Нормалните четкови мотори използват комутаторен механизъм използващ четки, за да прехвърли захранващото напрежение до намотките на ротора. При безчетковият двигател намотките се намират на статора и няма нужда от четки, а на ротора има постоянни магнити (фиг. 2.1).



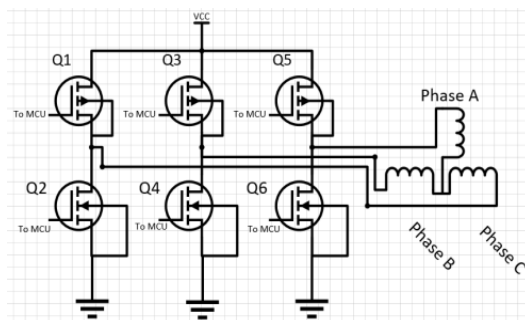
Фиг.2.1 Разглобен BLDC

Завъртането на ротора се извършва чрез контролиране на магнитното поле създадено от намотките на статора. Промяната на скоростта и посоката на въртене се определя от посоката и големината на приложеното напрежение. Управлението се осъществява чрез подаване на електрически импулси на две от трите намотки в даден момент. Създаденото магнитно поле от активните намотки си взаимодейства с това на постоянните магнити от статора и се създава въртящ момент, който задвижва двигателя. Изключително важен е момента на превключване на активните намотки. От него зависи постигане на максимален въртящ момент и плавна работа на двигателя [26,27]. Поради тази причина за управлението на BLDC е необходима съпътстваща електроника.



Фиг.2.2 Сигнали на трите намотки

За управление на стандартен BLDC са необходими 6 транзистора разделени в 3 кръга ($\frac{1}{2}$ H-Bridge).



Фиг.2.3 Електрическа схема на полу H-мост

Във всеки един момент се подава напрежение към 2 от намотките през един от горните транзистори и един от долните и третата намотка остава не захранена.

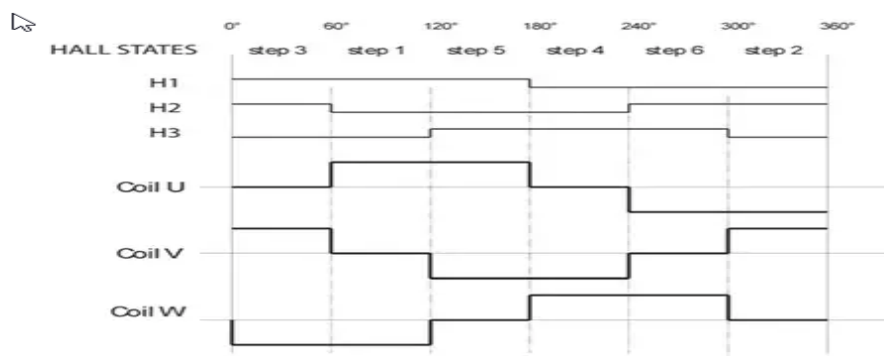
2.2 Методи за контрол на BLDC

Ще бъдат разгледани два метода за контрол – един сензорен и един без сензорен . В основата на всеки метод е желанието да се запази ъгълът между магнитния вектор на ротора и статора близо до 90 градуса, което ни осигурява правилна работа на двигателя.

Сензорен метод, използващ ефекта на Хол

Използват се допълнителни датчици за отчитане на положението на магнитния вектор на ротора спрямо този на статора [33-35]. Тези датчици дават възможност във всеки един момент да се определи в коя зона се намира векторът на магнитното поле и да се управлява комутацията на двигателя. Сензорите използват различни способи за отчитане на положението : магнитни, оптични, магнито-резистивни и т.н

Сензорите са поставени, така че да преминават от един ред на таблицата към друг точно в момента на комутацията на фазите. Това позволява да се определи в коя от 6те зони (фиг. 2.4) се намира магнитният вектор на ротора и така да се активират правилните 2 намотки.



Фиг.2.7 Схема на превключване на намотките

Недостатък на метода е наличието на допълнителни сензори и прилежащото им окабеляване както и конструкцията за закрепяне и нуждата от калибрация на положението им спрямо момента на комутация, както и температурната зависимост на сензорите.

120 градусов ШИМ метод

Управлението на BLDC може да бъде постигнато чрез използване на широчинно импулсна модулация (ШИМ) [36-38]. Чрез избиране на подходящо запълване на всеки един от управляващите сигнали на всяка фаза може да се постигне нужната комутация, а именно две захранени фази в един момент и трета в плаващо състояние. Може да се види на фиг.2.8. Чрез управление на запълването (duty – cycle) може да се контролира скоростта на движение , а чрез промяна на посоката на стъпките на превключване посоката на движение на двигателя. Изключително прост метод, който предоставя ниски загуби от превключване в частта на управляващите транзистори , но за сметка на това генерира голямо количество високи хармоници. Това довежда до повишение на загубите в мотора.

2.3 Опитна постановка

За изследване на методите за управление на BLDC беше създадена опитна постановка (фиг. 2.9) състояща се от :

BLDC 2208 с 14 магнита и 12 полюса

ИС състояща се от 3 ½ H-bridge DRV8313 за контрол на двигателя

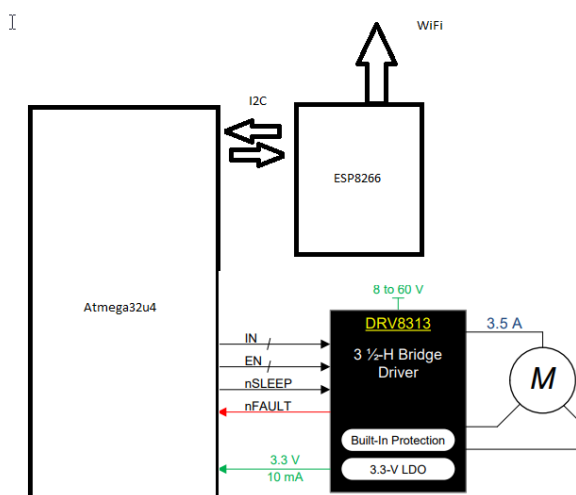
МК Pololulo A-Star Atmega32u4 за изработване на входните сигнали за управление

WiFi модул Esp8266 Huzzah свързан чрез I2C за МК , осигуряващ WiFi контрол

3xСензора на Хол SS411A [40]

3S1500mAh LiPo батерия за захранване [41]

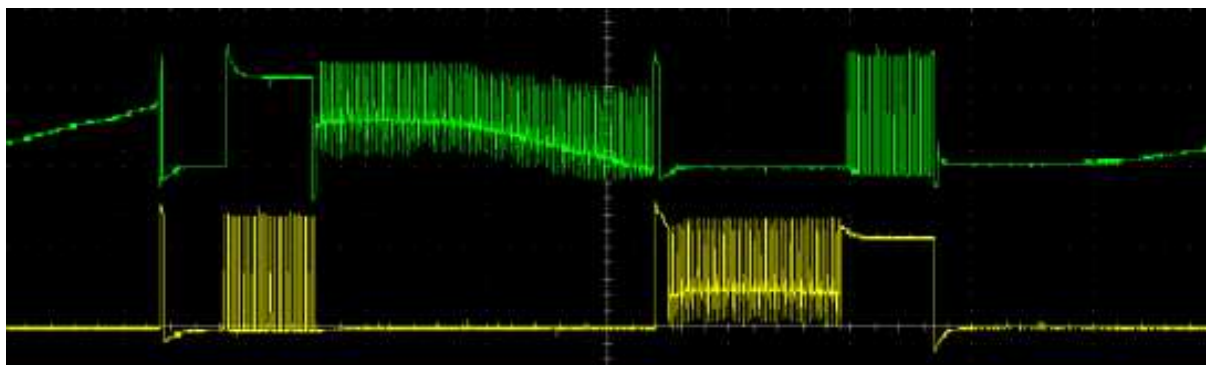
Цялостна идея е да се изгради система от модули, комуникиращи чрез I2C шина. Така лесно може да се управлява голям брой двигатели , както и да се използват различни ИС за тяхното захранване.



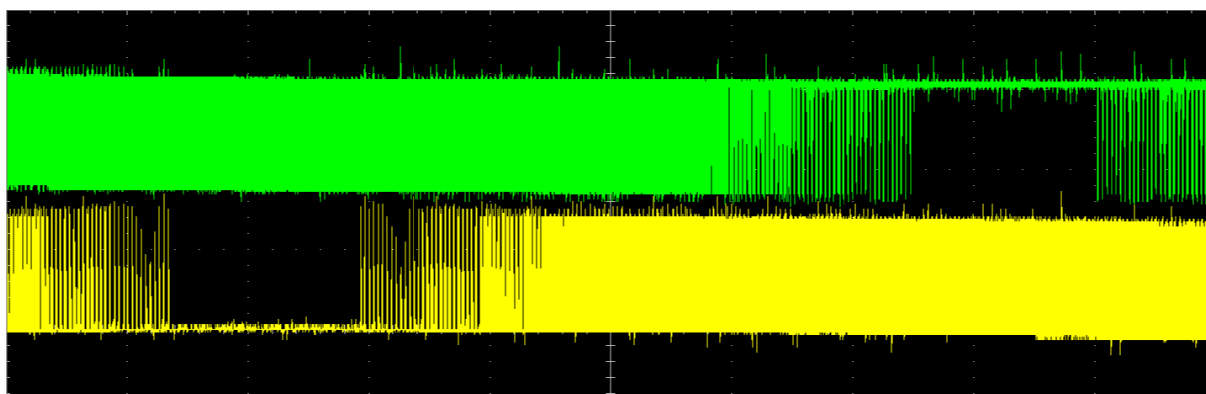
Фиг.2.10 Принципна схема

2.4 Изводи

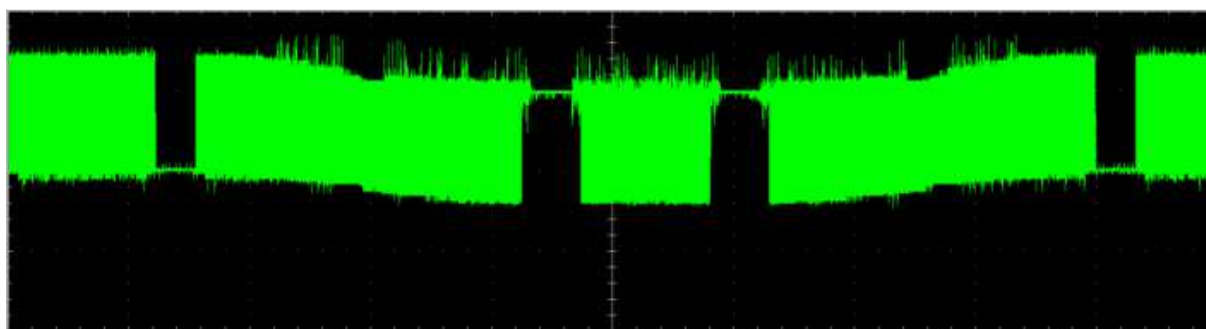
Бяха представени няколко метода за контрол на BLDC. Подбрани бяха два метода отговарящи на условието да могат да работят при ниски скорости и голяма прецизност и да нямат голяма комплексност.



Фиг.2.17 Изходни сигнали на мотор, управляван чрез сензори на Хол



Фиг.2.18 Изходни сигнали на мотор управляван чрез ШИМ



Фиг.2.19 Изходни сигнали на мотор управляван чрез ШИМ и Space вектор

Направени бяха изследвания, позволяващи съпоставянето на тези методи. От Фиг. 2.17 и Фиг. 2.18 можем да се види разликата в изходните сигнали на метода, използващ сензори на Хол и този, използващ PWM. Запълването при PWM е доста по-голямо от това

при сензорния метод, което довежда до по-голяма консумация на енергия и евентуални топлинни загуби. За сметка на това сензорният метод има доста по-обемна структура, множество допълнително окабеляване, което може да е фактор за евентуален отказ. В течение на изследването на няколко пъти гивната с датчиците на Хол се разкалибрира, което наруши правилната работа на двигателя.

3 Глава III. Изследване на MEMS инерциални модули

Комбинирането на данни от различни сензори изисква техните показания да са трансформирани в обща координатна система. В случая за такава е удобно да се избере земната. В главата са представени различните координатни системи и методите за преминаване от една в друга КС. Тези похвати са представени в нагледна опитна постановка даваща възможност за оценка на работата им спрямо нуждите на гимбала.

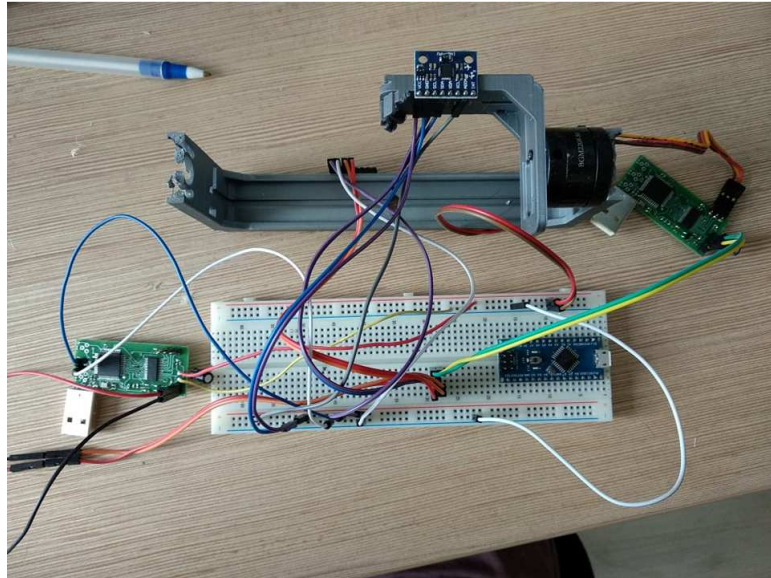
3.1 Експериментална постановка

Изпълнението е осъществено през Arduino програмна среда, използваща език на писане близък до С. Резултатите се визуализират в реално време от програма писана на Delphi.

Изполвана е платка Arduino Nano и IMU модул GY-521 MPU-6050 .

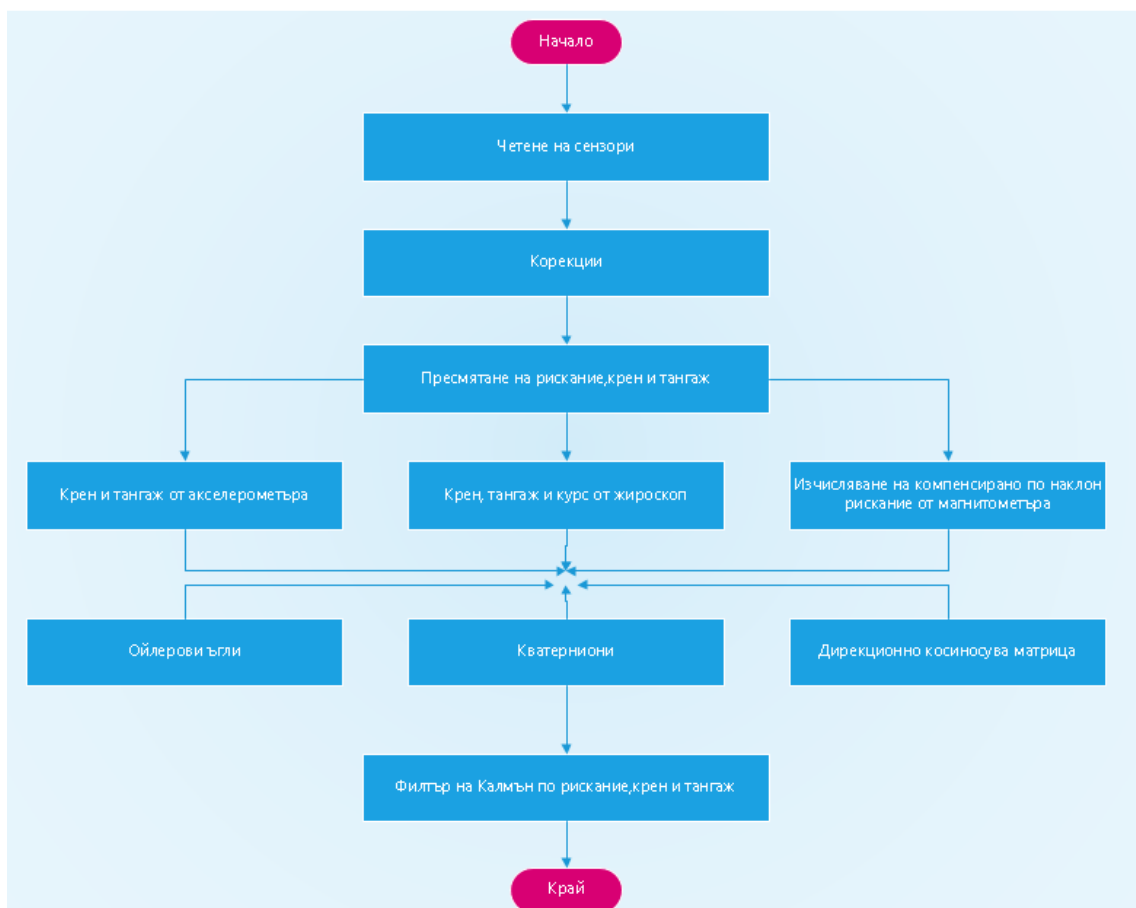
Навигационен алгоритъм

Целият изчислителен процес минава през микропроцесора на платката Arduino Nano. Съответно всички уравнения се решават в реално време от Arduino и резултатите се изпращат на компютър.



Фиг.3.3 Експериментална постановка

ИНС работен режим



Фиг.3.6 ИНС работен режим

Работният режим на системата започва със стартиране на таймер, определящ времето на дискретизация, който се нулира при всяко повторение на работния режим.

3.2 Анализ и оценка на резултатите

Първият проведен тест е при относително постоянна температура и стационарна система. В графиките създадени от софтуера за визуализация се използват следните означения:

В червено е изобразен изчисленият параметър от жirosкопите посредством Ойлерови ъгли без нискочестотен филтър, температурно компенсирани;

В зелено е изобразен изчисленият параметър от жirosкопите посредством Ойлерови ъгли с нискочестотен филтър, температурно компенсирани;

В жълто е изобразено изчисления параметър от жirosкопите посредством кватерниони с нискочестотен филтър, температурно компенсирани;

В синьо са изобразени обединените данни от жirosкопа и акселерометъра (магнитометър за рисканието), чрез филтър на Калман. Параметрите от жirosкопите са изчислени посредством Ойлерови ъгли с нискочестотен филтър, температурно компенсирани;

В оранжево е изобразени обединените данни от жirosкопа и акселерометъра (магнитометър за рисканието), чрез филтър на Калман. Параметрите от жirosкопите са изчислени посредством кватерниони с нискочестотен филтър, температурно компенсирани;

В бяло е изобразен изчисленият параметър от жirosкопите посредством Ойлерови ъгли с нискочестотен филтър, температурно не компенсирани.



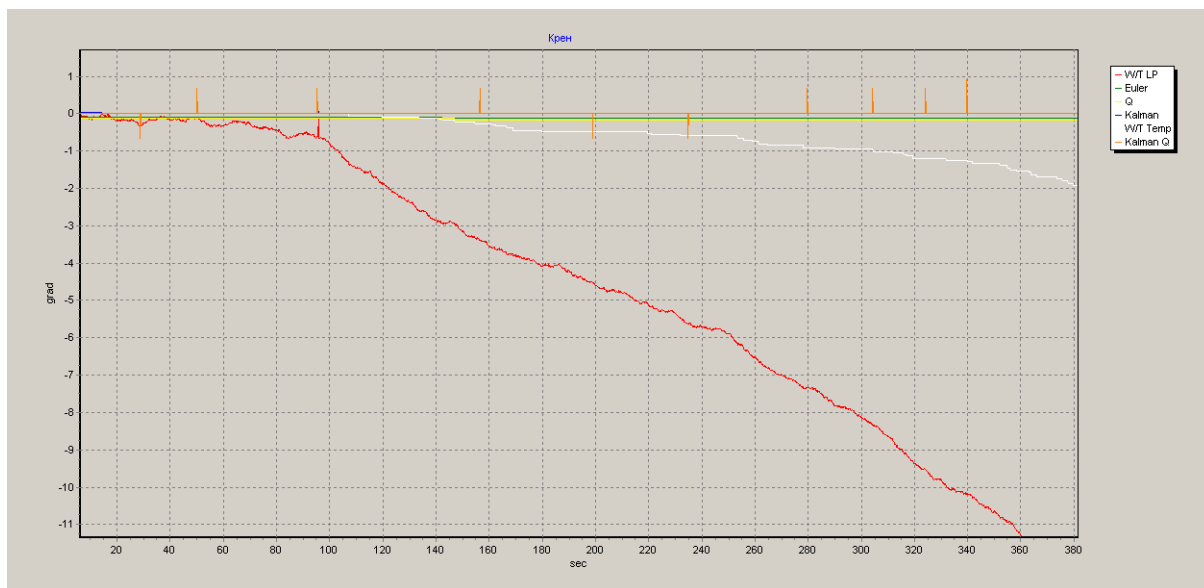
Фиг.3.7 Изменение по крен.



Фиг.3.10 Температура на сензорите

На фиг.3.7 се вижда отклонението на параметрите без използването на нискочестотен филтър. Прави впечатление сравнително еднаквите стойности на параметъра изчислен чрез Ойлерови ъгли и кватерниони.

Поради постоянната температура (фиг.3.10) графиките на температурно компенсирания и не компенсирания параметри съвпадат.



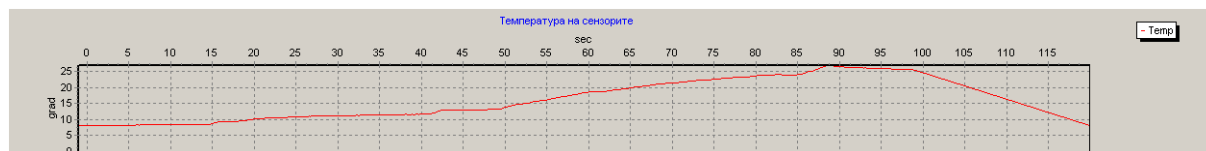
Фиг.3.11 Изменение по крен за дълъг период от време



Фиг.3.14 Изменение по температурата за дълъг период от време

При оставяне на по дълъг период от време на работа на сензорите се забелязва добрата работа на филтъра на Калман. В началния момент (до първите 15 s) се забелязва, че филтърът на Калман на базата на кватернионите дава по-точни резултати. След 100 s двете филтрации са идентични. Нефилтрираните параметри придобиват неизползваеми стойности.

Следващите графики показват температурната компенсация. Макетът остава неподвижен и температурата се променя от 10°C до 25°C.



Фиг.3.15 Промяна на температурата от 10°C до 25°C



Фиг.3.16 Изменение на параметрите по крен при промяна на температурата

На Фиг.3,16 ясно се вижда как температурно некомпенсираните параметри придобиват изключително голямо отклонение при промяна на температурата. Температурно компенсирани параметри имат отклонения и техните показания все още могат да се ползват.

3.3 Изводи

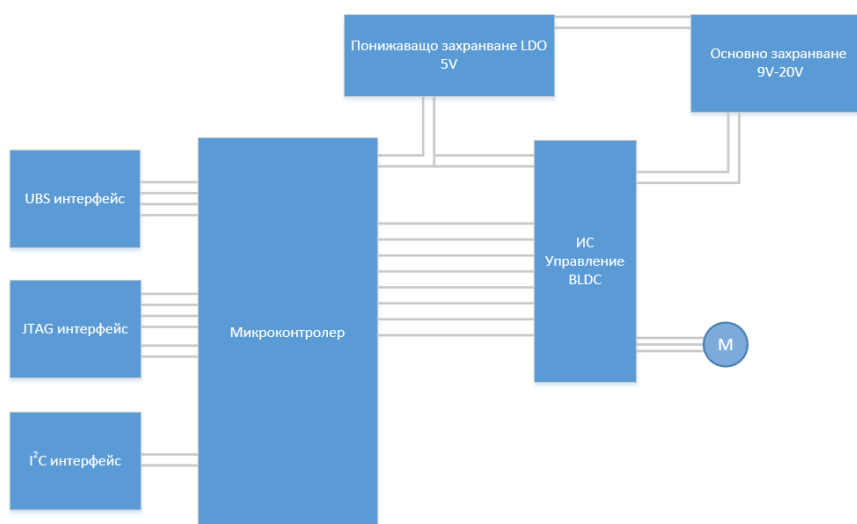
С проведените експерименти е представена разликата в използването на различните методи за премениване между координатните системи (Ойлер, Кватерниони). Представена е чувствителността на MEMS сензорите към температурата и методите за отстраняването на тази грешка. Ясно е показана ползата от обединяване на данните от жирокопа и акселерометъра при изчисление на отклоненията на ъглите и взаимното им компенсиране на грешки. Дадена е оценка на работата на нискочестотен филтър и на линеен Калман филтър. Показана е методика за компенсиране на показанията в Z оста, чрез използване на магнитометър както и неговото калибриране спрямо околната среда (магнитно меко и твърдо желязо).

4 Глава IV. Разработване на многоцелеви управляващ модул

В глава 4 е разработен многоцелеви модул, който може да изпълнява функцията както на ЦУБ така и на модул за управление на BLDC. Разработването включва проектиране на печатна платка и изготвяне на фърмуер за управление на модула. С помощта на блок схеми (UML диаграми) са представени алгоритмите на работа на ЦУБ и на модула за контрол на BLDC. На базата на тези диаграми е създаден програмен код, който да бъде зареден в микроконтролера на многоцелевия модул. За осъществяването на външен контрол на модула е реализирана система с безжична свързаност, осигуряваща WEB сървър и портал, чрез който да се осъществява управлението.

4.1 Обща постановка

На базата на експериментите проведени в глава 2 и глава 3 беше разработен многоцелеви модул, който ще може да се използва като модул за управление на безчеткови двигатели и като модул събиращ информацията от IMU сензорите и изготвящ управляващи команди към модул за управление на двигателите.



Фиг.4.1 Принципна схема на многоцелеви управляващ модул

При разработване на модула са поставени следните изисквания :

- Използване на евтин и достъпен микроконтролер
- Минимални размери на печатната платка
- Възможност за I2C свързаност
- Лесно пре-програмиране на firmware-а (USB/JTAG)
- Широк диапазон на захранващото напрежение (5V-20V)

4.2 Печатна платка

На базата на опитната постановка от глава 2 и изискванията от точка 3.1 е разработена печатна платка съвместяваща всички необходими компоненти:

MCU Atmel Atmega32u4 – популярен и достъпен [13]

ИС съвместяваща 3 ½ Н-мостове TI DRV8313 [17]

LDO осигуряващо нужното напрежение за MCU TI LP2985 [85]

3 Хол сензора HoneyWell SS400 [39]

USB и JTAG интерфейси за програмиране

Поддържа сензорно управление или без сензорно

I2C интерфейс

Захранващо напрежение до 20V

Когато платката се използва за събиране на данни от IMU и изготвяне на управляващи команди, частта с ИС TI DRV8313 не се запоява.

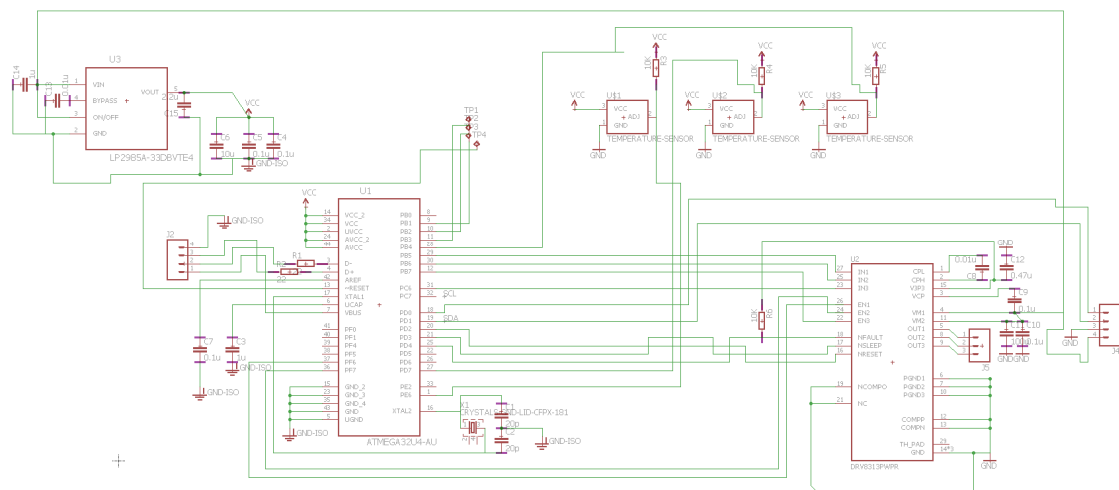
Разположението на компонентите е съобразено с няколко особености :

Външният кристал трябва да е максимално близко до контролера

ИС за управление на BLDC е максимално близко до главното захранване и до изводите към двигателя : в този участък може да протичат големи токове и съответно дължината и големината на захранващите пътеки трябва да е съобразена.

Изводите на сензорите на Хол са разположение в предния край на платката, което позволява тя да бъде монтирана точно зад двигателя и сензорите, без излишно окабеляване.

Под ИС за управление на BLDC е оставена голяма площадка играеща ролята на малък радиатор.



Фиг. 4.3 Принципна схема на модул за управление на BLDC

За правилната работа на микроконтролера (МК), интегралната схема (ИС) и сензорите на Хол е необходимо стабилно захранващо напрежение 5V. Поради факта, че въртящият момент на моторите е в зависимост от големината на захранването на силовата верига на ИС не може да се използва 5V по основното захранване на гимбала. Изграден е захранващ блок на базата на LDO TI LP2985 [85] и три филтриращи кондензатора с различни стойности [86-87].

За по-стабилна работа на МК е избрано използването на външен кристал 16MHz. Изведен е USB интерфейс за улесняване последващото програмиране и подновяване на софтуера (firmware) на платката. За функционирането на този интерфейс е необходима стартираща програма (bootloader), който се програмира с помощта на JTAG конектор.

Блокът за управление на трифазен електродвигател е изграден на база ИС TI DRV8313, като всичките 6 контролиращи входа са директно свързани за МК. Също така са свързани: канал за отчитане на грешки (извод Fault) , канал за рестартиране на модула в случай на установена неправилна работа и канал за поставяне на модула в спящ режим и минимална консумация на енергия.

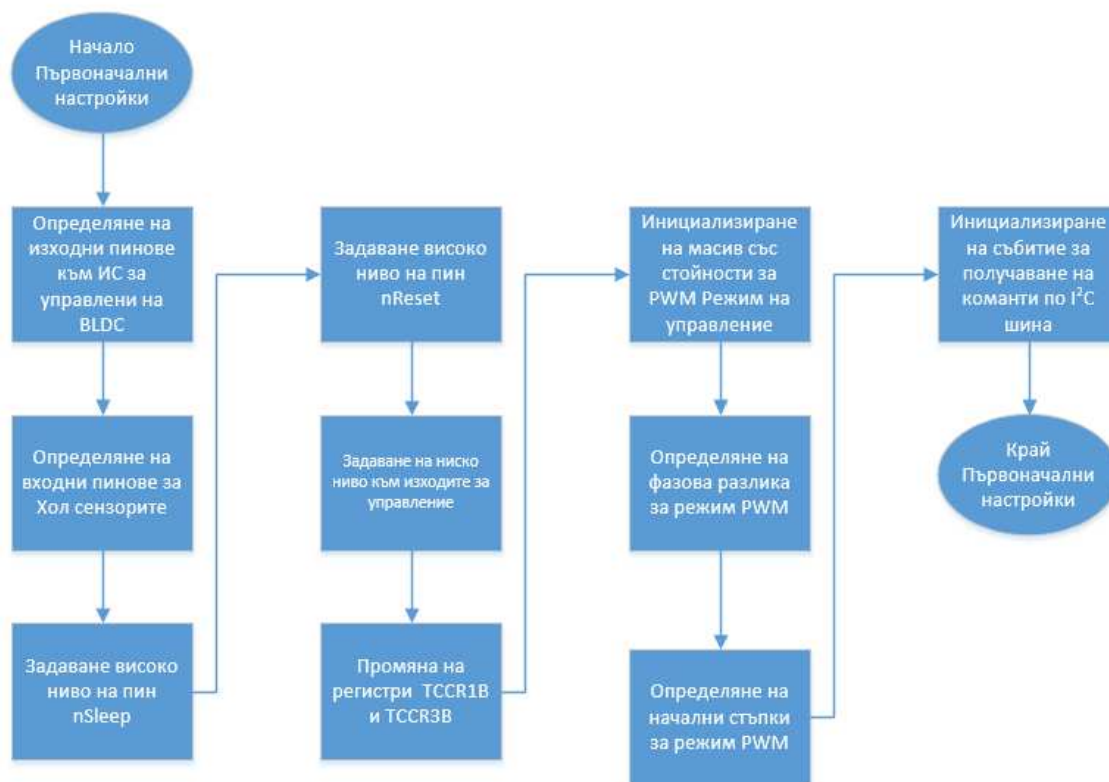
На печатната платка са предвидени 3 позиции за сензори HoneyWell SS400 с pull-up резистори на сигналния крак.

4.3 Модул за управление на BLDC

Използвайки платката на многоцелевия модул беше разработен алгоритъм за управление на безчетков двигател. След подаване на захранващо напрежение към модула се преминава през първоначални настройки на системата , регистриране на събитие, следящо във фонов режим за изпратени команди към модула и работен цикъл.



Фиг.4.6 Принципна схема на модул за управление на BLDC



Фиг.4.7 Първоначални настройки

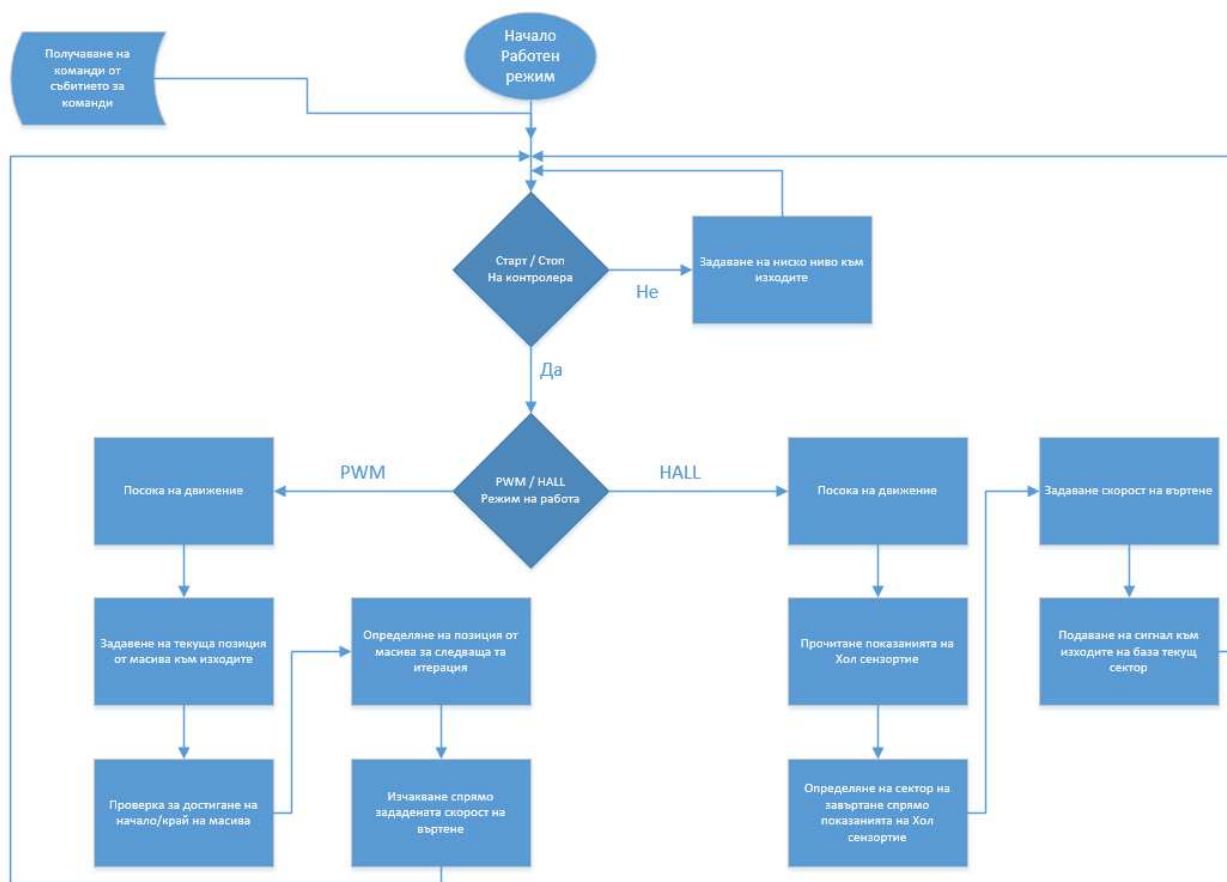
Когато се използва без сензорен режим, трябва да се промени честотата на модулация, което се осъществява чрез промяна на регистри TCCR1B и TCCR3B, както е описано в точка 2.4.2. Следваща стъпка е да се изчислят стъпките в управляващия масив и да се зададе коефициента на фазова разлика. Инициализацията завършва чрез инструктиране на контролера да „пусне“ във фонов режим процес (събитие), следящ за съобщения, изпратени по I2C шината, адресирани до неговия номер. Това събитие има за задача при получена команда да я разшифрова и да зададе променливите за проверка в работния цикъл. На този етап променливите се инициализират за мотор в спряло положение, без сензорно управление, с посока на движение по часовниковата стрелка и време изчакване за скорост 10mS.

Работен цикъл

Работния режим представлява група от действия, които се изпълняват циклично от микроконтролера с определена честота.

Работният цикъл започва с проверка на състоянието на променливата за разрешаване на работата „enable” . При стойност нула системата е в състояние „стоп” и изходите към двигателя остават в ниско ниво. При стойност единица системата преминава в състояние „старт”.

След това се проверява кой алгоритъм ще се вгради, този за работа в без сензорен режим или този за работа в сензорен (променлива „mode” съответно нула и единица за двата режима).



Фиг.4.8 Работен цикъл

Променливата „direct” определя посоката на завъртане на двигателя. В без сензорен режим (PWM режим) тази променлива смяна посоката на преместване на стойностите в масива със стъпките.

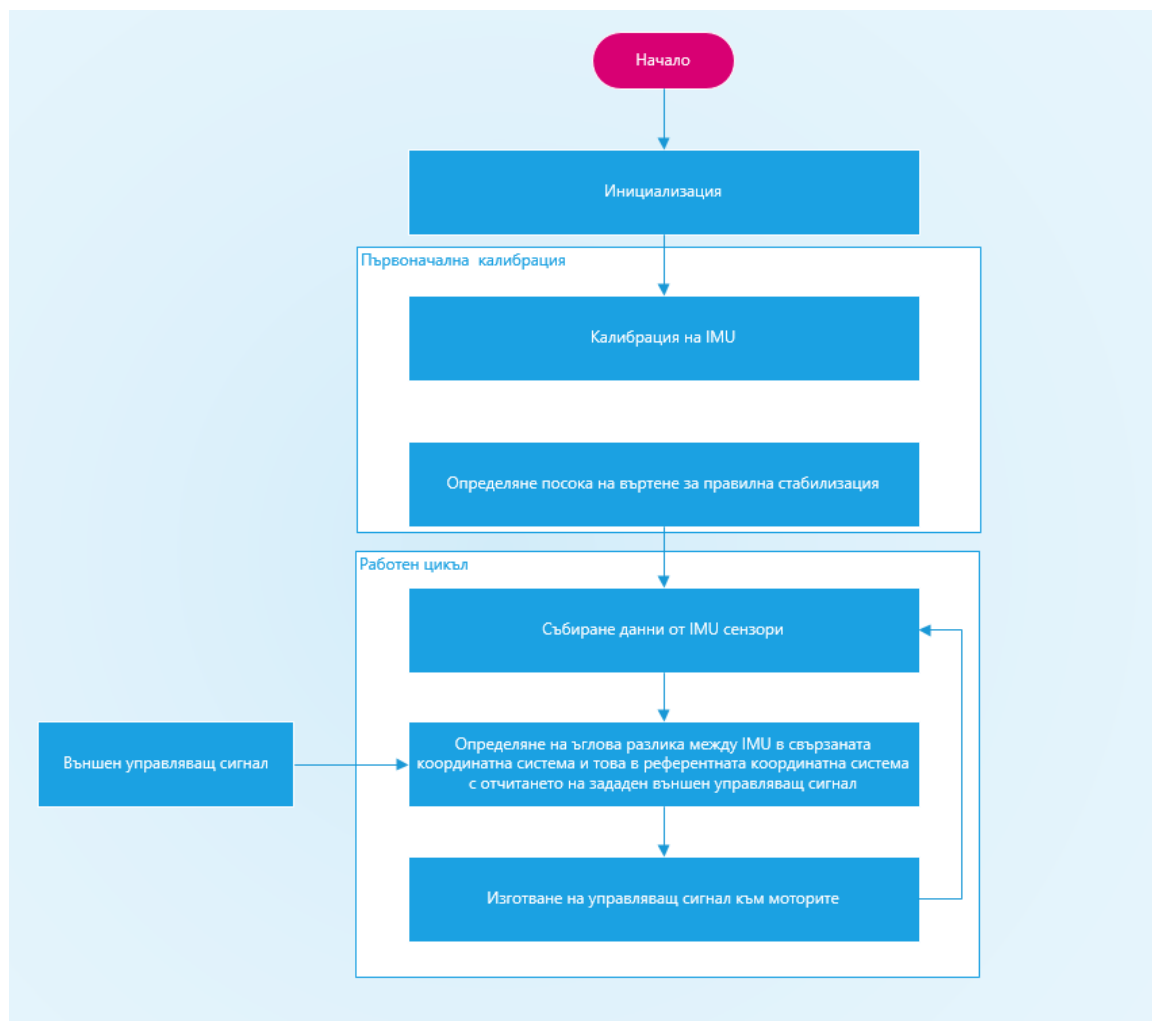
При без сензорен режим работата продължава по алгоритъма описан в точка 2.4.2 Съответно при сензорен режим той продължава чрез алгоритъма от точка 2.4.1.

Тази последователност се изпълнява при всяка итерация на работния цикъл като променливите за състояния могат да се променят чрез получени команди от събитието, следящо за команди.

4.4 Приложение на модула за управление на гимбал

Централният модул за управление има за задача да събира данните от IMU сензорите, да ги обработва и да изготвя управляващ сигнал към модула за управление на двигателите описан в точка 4.4.

Използват се два IMU сензора , един прикачен към най-външната рамка (условно неподвижна за тялото на гимбала) и още един IMU сензор прикачен към най-вътрешния контур (където е закачена камерата). Двата сензора се настройват да работят на два различни I2C адреса - 0x68 и 0x69. Това става по хардуерен подход като на единият от сензорите пин AD0 се установи във високо ниво [14]. Чрез събраните показания от двата сензора ЦУБ извършва преминаване от свързаната координатна система към земната и може да определи за всяка една ос на какъв ъгъл се е отклонила камерата в даден момент. Желанието ни е във всеки един момент камерата да запазва нулево отклонение спрямо земната координатна система. На базата на измерения ъгъл на отклонение се изработва изходен сигнал към моторите на всяка една ос с такава посока, че да компенсират промяната. Контролният сигнал се подава до тогава докато камерата не се върне в първоначалното си нулево състояние или такова зададено от външен източник.



Фиг.4.9 Алгоритъм на работа

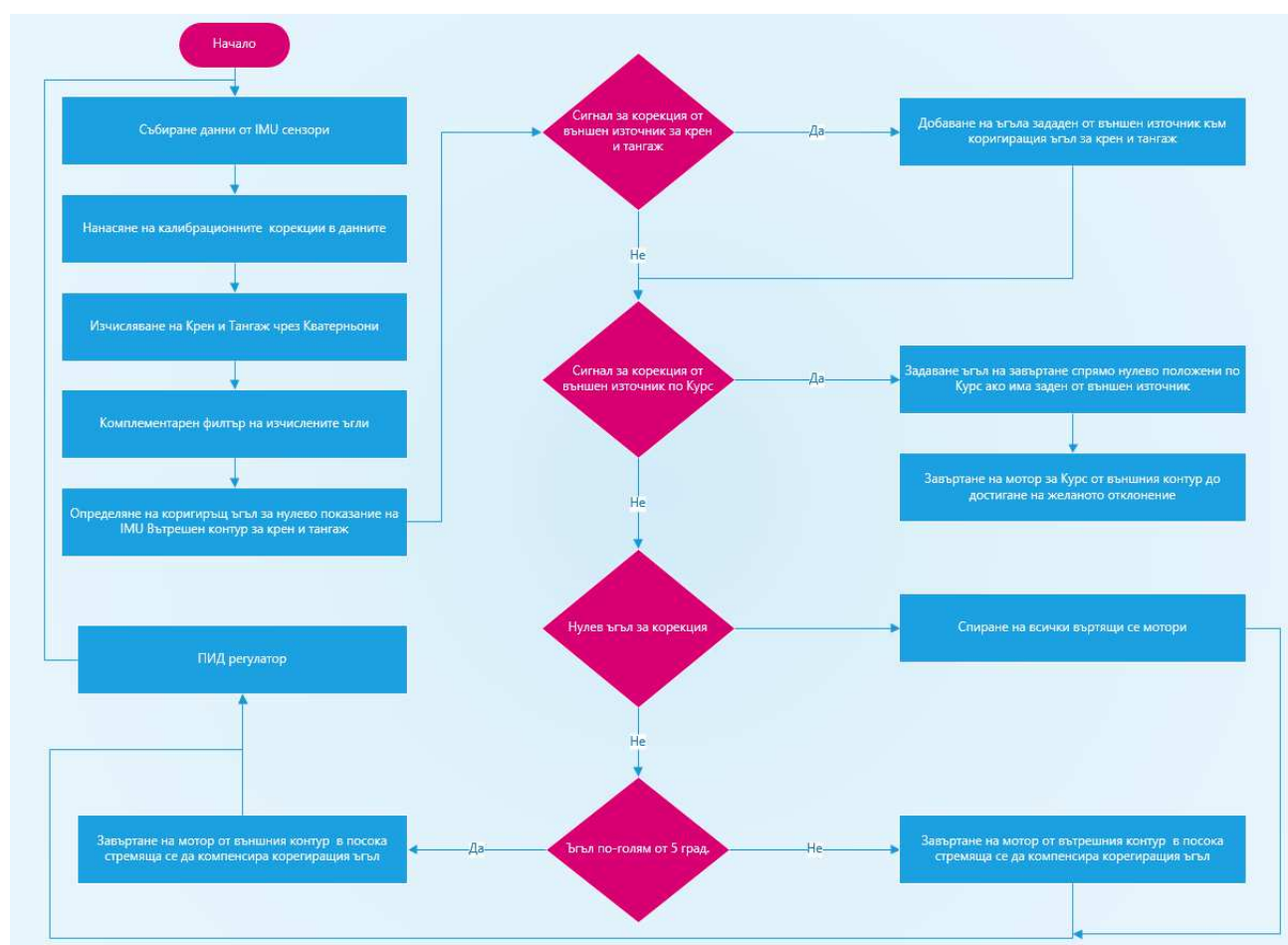
В работата на ЦУМ можем да разграничим няколко етапа. При стартиране на системата се извършва инициализация и първоначална калибрация, която включва задаване на коригиращи коефициенти на IMU модула и определяне на посока на въртене на двигателите. След което системата преминава в работен режим, където се извършва събиране на данни от сензорите и изготвяне на управляващ сигнал. По време на работния режим системата може да получава външни команди, коригиращи нулевото положение на камерата (тоест да се задава положение, в което да стои камерата, различно от нулевото).

Поради използването на множество повтарящи се компоненти (два еднакви сензора, 5 еднакви контролера за двигатели), удобен метод е да се напишат библиотеки/класове за работа с тях. Това ще доведе до една абстракция спрямо основната програма. Благодарение на това ще се спестят много повтарящи се редове

код и ще даде възможност в по-следващ момент да се променят някои от компонентите без това да се отрази на работата на главната програма и без да се пренаписва тя. Единствено ще е необходимо да се напише библиотека/клас за новото устройство, имаща същите променливи и функции.

Работен режим

Работният режим представлява група от действия, които се изпълняват циклично от микроконтролера с определена честота. Тази честота зависи от сложността на операциите и трябва да е синхронизирана с честотата на опресняване на сензорите.



Фиг.4.13 Работен режим

Използвайки двете променливи за работа с IMU се прочитат суровите стойности, обработват се, използвайки кватерниони и комплементарен филтър (избрани спрямо анализа в глава 3) и се получават ъглите на крен и тангаж от двата сензора. На базата на това се изчисляват разликата между показанията им.

Последователно се работи с ъгъла по крен и после аналогично с този по тангаж. Ако няма разлика в показанията по съответната ос не предприемаме действие (двигателите стоят в позиция моторна спирачка). При наличие на разлика в показанията по някоя ос следва да се установи дали тя е голяма или не. От нула до пет градуса се приема за малка разлика, над пет градуса се приема за голяма. Съответно се подава сигнал към мотора, контролиращ съответната ос от вътрешния контур или външния (малка и голяма разлика) с такава посока, за да изравни показанията на сензорите. Сигналят за завъртане се подава докато разликата не стане нула или не достигне зададено положение от външен източник.

По курс системата не следи за разлика между сензорите. Функцията тук е гимбалът да следва плавно завъртането по оста. Също така при статично положение на гimbала оста може да се завърти от команда от външен източник.

5 Глава V. Проектиране на 3D модел и прототип на гимбал

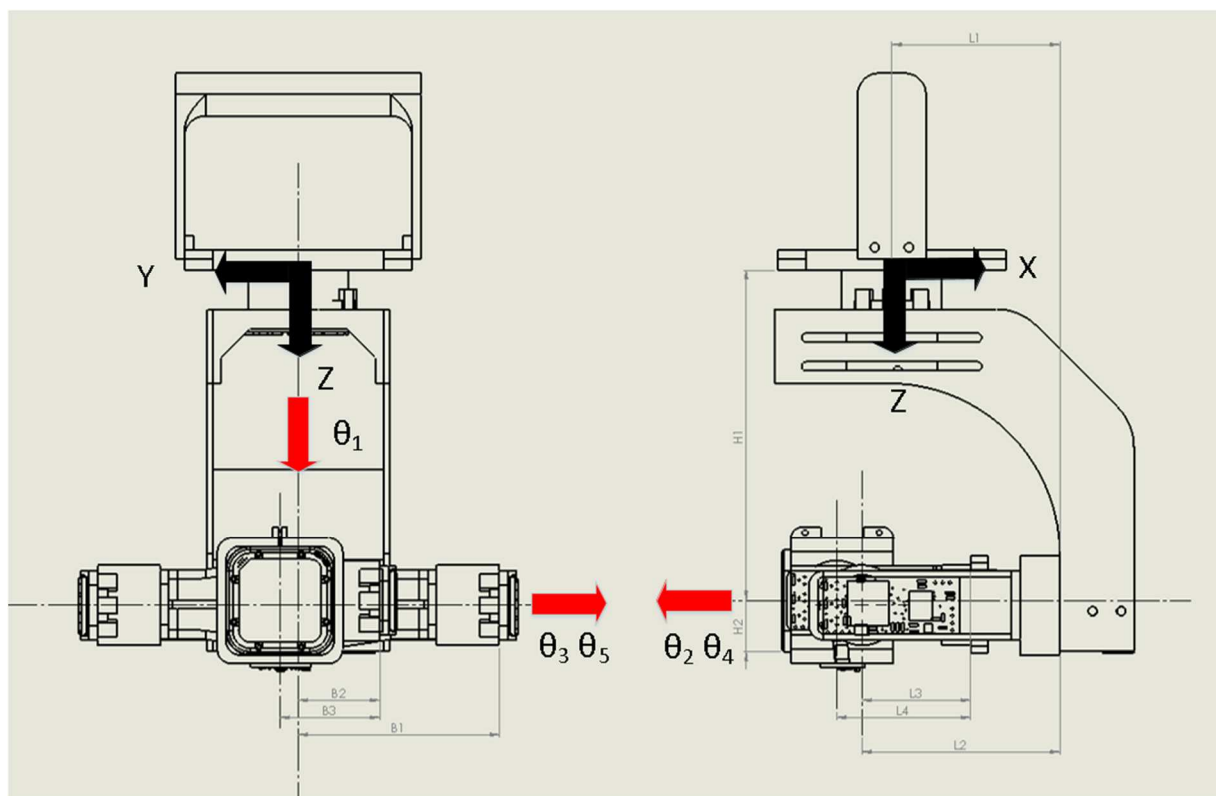
В глава 5 е представена кинематиката и динамиката на 5-осев гимбал. Проектиран е 3D модел на базата на всички поставени изисквания към тялото на гimbала. Разгледана е всяка една част с характерните и особености. Изработен е прототип чрез 3D принтиране. Извършени са експерименти за установяване ползата от разработката и е направен анализ на получените резултати.

5.1 Механика

Може да се приеме, че платформата е изградена от 6 твърди тела (0-5), съединени чрез 5 ротационни връзки. Всяка връзка е задвижвана посредством безчетков електро двигател. Тялото трябва да е така проектирано, за да бъде достатъчно здраво и същевременно с приемливо тегло. То трябва да може да понесе тежестта на всички компоненти и външните претоварвания породено от движението на гimbала и от движението на БЛА без да се наблюдават пластични деформации или поне те да са минимални.

Важен момент е центърът на масите на всички компоненти да е така балансиран, за да може системата оставена в покой във всяка една позиция да я запазва без външна намеса. Поради това тялото, в голямата си част, е симетрично спрямо ос Z. Това би облекчило работата на двигателите и намалило консумацията на електроенергия, респективно повишило времето на работа на системата. Поради неспособност да се предвиди с голяма точност тежестта на всички компоненти (проводници, болтчета, спойки и др.) и поради несъвършенство в производствения процес трябва да се предвиди механизъм за микро реглаж на баланса на всяка една ос.

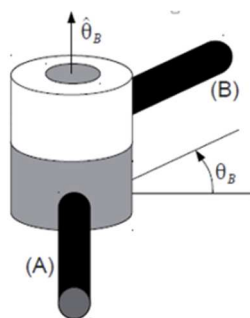
Проектирането на модела е съобразен с технологията за последващото му производство – 3D принтиране. Използването на тази технология позволява да се предвидят места за окабеляване, за интегрирани легла за всеки един модул и лесно добавяне на сензори на Хол.



Фиг.5.1 Координатни оси и размери

5.2 Кинематика

Кинематиката на една механична система [101], описва преместването и завъртането на компонентите ѝ във времето и пространството спрямо геометричните форми и размери. Силите, които пораждат движението на телата в системата не се взимат под внимание в този случай. В основата на кинематиката на система от твърди тела (MBS – multy body system) стои описанието на движението на всяко тяло в координатна система (КС), прикачена към друго тяло, използвайки матричен запис. Основната цел е да обединим серия от трансформации между твърдо тяло-прикачена КС. Трансформациите описват относителното завъртане и разстояние между телата спрямо степените на свобода. Гимбалът се състои от 5 ротационни стави, като всяко една от тях има 1 степен на свобода. Общо за цялата система се получават 5 степени на свобода курс, крен, тангаж и дублирани крен и тангаж. С добавянето на още две оси си гарантираме невъзможност от загуба на степен на свобода (gimbal lock).



Фиг.5.11 Става с една ротационна степен на свобода

Кинематика на MBS представя зависимостта от конфигурацията на ставите и крайната позиция на изпълнителния механизъм (в случаят камерата). Използваме два типа оси : координатни оси (x, y, z) и оси на ставите ($_1, _2, _3, _4, _5$). Осите на ставите описват ъгловото завъртане на гимбала и се наричат курс($_1$), крен($_2$) и тангаж($_3$). Трябва да се отбележи, че в конкретния случай имаме още две дублиращи оси $_4$ и $_5$ съответно на крен и тангаж. Началото на всяка една свързана координатна система съвпада с оста на въртене на съответния двигател и с точката му на прикачване към предходното тяло, посоката на осите съвпада с посоката на главните оси.

В авиацията е прието :

Курс : описва движение около ос Z на тялото

Крен: описва движение около ос X на тялото

Тангаж: описва движение около ос Y на тялото

Всяко тяло има само една степен на свобода следователно :

_1 описващо движението на тяло 1 около ос z курс

_2 описващо движението на тяло 2 около ос x крен

_3 описващо движението на тяло 3 около ос y тангаж

_4 описващо движението на тяло 4 около ос x крен

_5 описващо движението на тяло 5 около ос y тангаж

Координатните системи, свързани към телата на гимбала са ориентирани така, че да са успоредни една с друга ($_1; _2; _3; _4; _5$) = (0; 0; 0; 0; 0).

5.3 Опитна постановка

За анализ и оценка на работата на 5-осевия гимбал са реализирани няколко сравнителни експеримента. За тях са избрани характерни ситуации, при които възникват смущения и вибрации. Всяка една ситуация е заснета по три способа : камера без стабилизация, камера прикрепена към 3-осев гимбал и камера прикрепена към прототипа на 5-осевия гимбал като са използвани и различни обекта на прикрепяне: човек и автомобил. Всяка една ситуация е повторена многократно с цел потвърждаване на резултатите.

Експериментите от човешка ръка включват :

- Въртене по крен и тангаж от неподвижен човек
- Ходене по равен път без умишлено завъртане
- Тичане по равен път без умишлено завъртане

При експериментите с използването на автомобил са предвидени следните ситуации :

- Движение по прав път

- Движение по завой

Експериментите се изпълняват по една и съща отсечка със скорост на движение 30-60км/ч:

На базата на заснетите видеа е направен визуален анализ и оценка на качеството на изображението. За удобство в сравнителният анализ видеата са разделени в 6 категории: човек на място, ходене, тичане, с кола по прав път, с кола по път със завой и изглед на камерата напред и с кола по път със завой и изглед на камерата настрани. Във всяка една от категориите първо е показано видеото заснето с камера без стабилизация, след това видеото от камерата прикачена към 3 осев гимбал и накрая видеото от камерата прикачена към 5 осевият гимбал. Във всички ситуации видеата заснети с помощта на гимбал имат неоспоримо предимство в качеството на изображението спрямо твърдо прикачената камера.

Ще започнем с разглеждане на видеото от човек на място. Камерата се завърта по крен и тангаж симулирайки полет на БЛА с изкачване и завой. Ясно се вижда разликата между твърдо прикачената камера и тези прикачени към гимбалите. При използването на гимбал хоризонта остава равен независимо от положението на обекта към който е прикачен. Съществена разлика между 3 и 5-осев гимбал не се наблюдава в конкретната ситуация. Важно е да се отбележи, че всъщност по време на експериментите 5-осевият гимбал е всъщност 4 осев - 5тата ос по курс не функционира. Поради този факт в повечето видеа се наблюдава леко изместване на видеото по тази ос и доказва нуждата от нейното съществуване. В показаните видеа ще се фокусираме предимно в отклоненията по завъртане по крен и тангаж както и върху вертикални премествания.

Следват видеата с ходене и тичане където ясно можем да забележим всяко отклонение на картината спрямо хоризонта. При тези ситуации 5-осевият гимбал има ясно изразено преимущество. При него не се наблюдава отместване на хоризонта при стъпките на човека. Това е още по-ясно изразено при тичането.

По сериозна е ситуацията с неравностите и вибрациите при използване на автомобил. Избран е прав участък с леки неравности и участък със завой, павата и дупки. При разглеждането на трите видеа неоспоримо се забелязва по-добрата корекция на 5

осевия гимбал. При последното видео когато камерата гледа настрани от движението се наблюдава известно размазване на образа при видеото от 5 осевия гимбал, което се дължи на неправилни настройки на камерата и не са свързани с работата на гимбала.

Видеата могат да бъдат видени на следния интернет адрес :

- На място: <https://www.youtube.com/watch?v=GOsnYWF6Pxc&feature=youtu.be>
- Ходене : <https://www.youtube.com/watch?v=MLm2XYU-rg&feature=youtu.be>
- Тичане: <https://www.youtube.com/watch?v=UhcIJOIG3M&feature=youtu.be>
- Прав път: https://www.youtube.com/watch?v=E_klxliGyfl&feature=youtu.be
- Завой напред: <https://www.youtube.com/watch?v=xYzKfEeJ8S4&feature=youtu.be>
- Завой настрани:
<https://www.youtube.com/watch?v=kRgKRTGygVg&feature=youtu.be>

Заклучение

Настоящият дисертационен труд представя разработката на 5-осев гимбал за БЛА. Описани са видовете гимбали и основните компоненти на една жиро-стабилизиране система. Изяснени са характеристиките на всеки един елемент като са отбелязани стандартно използвани похвати и възможности за тяхното подобрене. Показани са причините поради, които се налага търсене на оптимизация и подобряване на характеристиките на стандартен гимбал както и са формулирани целите и задачите на дисертационния труд.

Представени са няколко метода за контрол на BLDC. Подбрани бяха два метода отговарящи на условието да могат да работят при ниски скорости и голяма прецизност и да нямат голяма комплексност. Направени бяха изследвания, позволяващи съпоставянето на тези методи.

Направен е анализ за използване на MEMS инерциални модули. С проведените експерименти е представена разликата в използването на различните методи за преминаване между координатните системи (Ойлер, Кватерниони). Представена е чувствителността на MEMS сензорите към температурата и методите за отстраняването на тази грешка. Ясно е показана ползата от обединяване на данните от жиро-скопа и акселерометъра при изчисление на отклоненията на ъглите и взаимното им компенсиране на грешки. Дадена е оценка на работата на нискочестотен филтър и на линеен Калман филтър. Показана е методика за компенсиране на показанията в Z оста, чрез използване на магнитометър както и неговото калибриране спрямо околната среда (магнитно меко и твърдо желязо).

Разработен е многоцелеви модул, който може да изпълнява функцията както на ЦУБ така и на модул за управление на BLDC. Разработването включва проектиране на печатна платка и изготвяне на фърмуер за управление на модула. С помощта на блок схеми (UML диаграми) са представени алгоритмите на работа на ЦУБ и на модула за контрол на BLDC. На базата на тези диаграми е създаден програмен код, който да бъде зареден в микроконтролера на много целевия модул. За осъществяването на външен контрол на модула е реализирана система с безжична свързаност, осигуряваща WEB сървър и портал, чрез който да се осъществява управлението.

Представена е кинематиката и динамиката на 5-осев гимбал. Проектиран е 3D модел на базата на всички поставени изисквания към тялото на гимбала. Разгледана е всяка една част с характерните и особености. Изработен е прототип чрез 3D принтиране. Извършени са експерименти, чрез които се показва преимуществото на 5-осевия гимбал.

Въпреки постигнатите резултати има няколко насоки, в който може да се подобри създаденият гимбал :

- Доразработвана на пълно функционираща 5та ос
- Използване на по-устойчива шина за пренос на команди – хибрид между I2C и серийна комуникация (rs-485,LIN и др.)
- Използване на операционна система в реално време - RTOS

Приноси

Научно-приложни

Представен е подход за използване и контрол на безчеткови електродвигатели при проектиране на 5 осев гимбал, на база анализ на съществуващите методи, отговарящи на условието за работа при ниски скорости и голяма прецизност.

Представен сравнителен анализ на данни по схема, при използване на MEMS инерциални модули.

Проектиран и изработен многоцелеви модул, който изпълнява ролята, както на централен така и на модул за управление на безчетков електродвигател.

Изработен е функциониращ прототип на базата на създадения модел, давайки възможност да се оценят на живо изпълнените задачи

Приложни

Изработен е 3D модел на гимбал, оптимизиран за 3D принтиране и конструкция.

Проведени са експериментални изследвания, доказващи работоспособността на проектирания гимбал за целите на стабилизиране на видео от камера.

Благодарности

Изразявам най-сърдечната си благодарност и признателност на моя научен консултант Доц. Д-р Мая Димитрова за неговото ръководство и научни консултации, навременни съвети, критични забележки и конкретни препоръки, за подкрепата му по време на цялостната ми работата върху дисертационния труд.

Също така благодаря на всички колеги от ИР-БАН за оказаната помощ, топлото отношение, интереса към работата ми и провокативните дискусии.

Научни публикации

Hristov, B. Attitude and heading reference system for UAVs. In: M. Dimitrova and H. Wagatsuma (Eds.) Cyber-Physical Systems for Social Applications, IGI Global: Hershey, Pennsylvania, <https://www.igi-global.com/publish/call-for-papers/call-details/3210>

Hristov, B. (2018) Methods for Controlling Brushless DC Electric Motor (BLDC) Applicable in Robotics Complex Control Systems, ISSN: 2603-4697 (Online) 53-58, http://ir.bas.bg/ccs/2018/10_hristov.pdf

Hristov, B. Modeling of 5 axis Gimbal for Video Capturing, Automatics And Informatics 2017 , ISSN 1313-1850, 57-60p.

Литература

- [1] J.Sturm, *Autonomous Navigation for Flying Robots*, Technische Universität München, 2014
- [2] L. Barker,J. Houck ,*Theoretical Three and Four-Axis Gimbal Robot Wrists*, NASA Technical Paper 2564 , 1986
- [13] Atmel Corporation, *ATmega16U4/ATmega32U4*, Datasheet, 2015
- [14] InvenSense Inc, *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4*, Datasheet, 2013
- [17] Texas Instruments, *DRV8313 Triple Half-H-Bridge Driver IC*, Datasheet, 2015
- [26] Rifat Hazari, Effat Jahan, *Design of a Brushless DC (BLDC) Motor Controller* , ICEEICT, 2014
- [27] José Carlos Gamazo-Real , Ernesto Vázquez-Sánchez and Jaime Gómez-Gil , *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*, ISSN 1424-8220. 2010
- [33] Hank Wu, *Speed control of BLDC motors using hall effect sensors based on DSP*, International Conference on System Science & Engineering. 2016
- [34] Atmel, *Sensor-based control of three phase Brushless DC motor*, Application Note, 2006
- [35] Eduardo Viramontes, *BLDC Motor Control with Hall Effect Sensors*, Systems and Applications Engineering, 2010
- [36] ST, *PWM MANAGEMENT FOR 3-PHASE BLDC MOTOR DRIVES*, Application Note, 2009
- [37] S.L. Tade , Ravindra Sor , S.V. Kinkar, *Digital PWM Techniques and Commutation for Brushless DC Motor Control Applications*, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering,2016
- [38] Alphonsa Roslin Paul , Mary George, *Brushless DC motor control using digital PWM techniques*, International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies, 2011
- [39] Honeywell , *Bipolar, Latching, and Unipolar Hall-effect Digital Position Sensor ICs: SS400 Series, SS500 Series*, Datasheet,2017
- [41] David Tenenbaum , *Coordinate Systems*, EEOS 281 – UMB, 2010

- [85] Texas Instruments, *LP2985 150-mA Low-noise Low-dropout Regulator With Shutdown*, Datasheet, 2015
- [86] “*Noise Suppression by EMIFIL® Basics of EMI Filters*,” Murata Manufacturing Technical Material, 1986
- [87] Muhammad H. Rashid, *UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES AND ACTIVE FILTERS*, CRC Press, 2005
- [88] I. E. Sener, *Stabilization of an Image Based Tracking System*, METU, 2015.
- [89] B. Ekstrand, *Equations of Motion for A Two Axes Gimbal System*, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2001.
- [90] J. Hilkert, *Inertially Stabilized Platform Technology Concepts and Principles*, IEEE Control Systems, 2008.
- [91] H. Khodadadi, M. R. J. Motlagh, and M. Gorji, *Robust Control and Modeling*
- [93] Nicholas S. Cross, *On Board Video Stabilization for Unmanned Air Vehicles*, San Luis Obispo, 2011.
- [94] Martin Ernesto Orejas, *UAV Stabilized Platform*, Kiruna, 2007.
- [95] Ole C Jakobsen and Eric N Johnson, *Control Architecture for a UAV-Mounted Pan/Tilt/Roll Camera Gimbal*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 30332-0150, AIAA 2005-7145, 2005.
- [96] Won Hong, *Adaptive Control of a Two Axis Camera Gimbal*, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [97] Jeffrey D. Barton, *Fundamentals of Small Unmanned Aircraft Flight*, Online, 2012
- [98] David G. Hull, *Fundamentals of Airplane Flight Mechanics*, Springe, 2007
- [101] R N Jazar. *Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control*. Springer, 2007.

MODELLING OF 5 AXIS GIMBAL FOR VIDEO CAPTURING

With the development of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), in particular multi-rotors, their use for a variety of tasks requiring a gyro-stabilized platform (Gimbal) is becoming increasingly popular. One of them is video recording. The main purpose of this platform is to stabilize and position the load and to compensate for the external disturbances caused by vibrations in the construction and movement of the UAV. It is common practice to use 3 axial symbols for this purpose, as many as the axes of UAV motion. There are situations in which they cannot accomplish with the assigned tasks well enough, such as blurring the image, dropping the stabilization for a fraction of a second, shutting down the gimbal altogether due to driver overload. Purpose of this dissertation is to design and create a 5 axle gyro-stabilized platform for small UAVs, which until now is characteristic of large pilots (helicopters, airplanes).

Chapter 1 presents the types of gimbals and the main components of a gyro stabilization system. The characteristics of each element have been clarified, with standard techniques used and options for improving them. The reasons for the necessity to search for optimization and improvement of the characteristics of a standard gimbal are shown, as well as the goals and tasks of the dissertation are formulated.

Chapter 2 introduces control features and control methods for brushless, low-speed electric motors. An experimental set-up has been made to compare different control methods and presents their disadvantages and advantages over the task.

Chapter 3 discusses various techniques for handling raw data from a MEMS inertial sensor including Euler angles, Quaternions, Directional Cosine Matrix, error types and their compensation. To evaluate the different methods and their applicability to the specific task, an experimental statement was made, through which data were collected and an analysis of the results obtained.

In Chapter 4, a multi-purpose module has been developed that can serve as both a Central Control Unit and a BLDC control module. The development involves designing a PCB and designing a firmware to manage the module. With the help of block diagrams (UML diagrams), the algorithms of the CCU and the BLDC control module are presented. Based on these diagrams a program code has been created to be loaded into the microcontroller of the multi-target module. For the external control of the module, a system with wireless connectivity has been implemented, providing a WEB server and a portal through which the management can be carried out.

Chapter 5 presents the kinematics and dynamics of 5 axis gimbal. A 3D model was created based on all requirements set to the body of the gimbal. Each part with characteristics and peculiarities is considered. A prototype was made using 3D printing. Experiments were carried out to determine the usefulness of the development and an analysis of the results obtained.

