STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Martin Havlíček

Octakoptéra TF-M8X a měření elektrického pole

Gymnázium, Praha 6, Arabská 14

Kraj: Hlavní město Praha

Vedoucí bakalářské práce: Jan Lána

Studijní obor: 79-41-K/41 – Gymnázium (Programování)

Praha 2020

Chtěl bych poděkovat Richardu Havlíčkovi, Jakobu Kákonovi, Romanu Dvořákovi, Tomáši Báčovi, Michalu Danešovi a Dušanu Jánskému za nápady a pomoc na projektu.

Prohlašuji, že jsem jediným autorem tohoto projektu, všechny citace jsou řádně označené a všechna použitá literatura a další zdroje jsou v práci uvedené. Tímto dle zákona 121/2000 Sb. (tzv. Autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů uděluji bezúplatně škole Gymnázium, Praha 6, Arabská14 oprávnění k výkonu práva na rozmnožování díla (§ 13) a práva na sdělování díla veřejnosti (§ 18) na dobu časově neomezenou a bez omezení územního rozsahu.

V ..... dne ....

Podpis autora

Název práce: Octakoptéra TF-M8X a měření elektrického pole

Autor: Martin Havlíček

Gymnázium: Gymnázium, Praha 6, Arabská 14

Vedoucí bakalářské práce: Jan Lána, Programování

Abstrakt: Práce se zabývá vývojem univerzální multikoptéry, která bude měřit elektrické pole v okolí. Tělo multikoptéry bude z dílů, které jsou možné vytisknout na 3D tiskárně. Pomocí měřecího zařízení připevněného na spodku dronu bude mít uživatel možnost změřit elektrické pole v okolí. To se následně zobrazí na mapě s aktualními hodnotami. Z těchto dat bude moci uživatel například najít chybu v síťi elektrického vedení nebo zjistit stav aktuálního počasí.

Klíčová slova: multikoptéra, dron, 3D tisk, UAV

Title: Octacopter TF-M8X and electric field measurement

Author: Martin Havlíček

High School: Gymnázium, Praha 6, Arabská 14

Supervisor: Jan Lána, Programming

Abstract: The thesis deals with the development of a universal multicopter that will measure the electric field in the surroundings. The multicopter body will consist of parts that can be printed on a 3D printer. Using a measuring device attached to the bottom of the drone, the user will be able to measure the electric field in the vicinity. This is then displayed on the map with the current values. From this data, the user will be able, for example, to find a fault in the power grid or to check the current weather.

Keywords: multicopter, drone, 3D print, UAV

Obsah

Úvod **3**

1 První prototyp **4**
1.1 Výběr komponentů . . . 4
1.2 První návrh . . . 5
1.3 Realizace návrhu . . . 5
1.3.1 Kontrola a testy komponentů . . . 5
1.3.2 Jádro dronu . . . 6
1.3.3 Upevnění motorů . . . 7
1.3.4 Distribuční síť . . . 8
1.4 Letové testy . . . 9
1.5 Shrnutí chyb . . . 10
1.5.1 Váha konstrukce . . . 10
1.5.2 Specifikace motorů . . . 10
1.5.3 Přitížení konektorů . . . 10
1.5.4 Zajištění ramen . . . 10
1.5.5 Složitost údržby . . . 11
1.5.6 Množství nákladu . . . 11
1.6 Karbonová verze . . . 11

2 Prototyp TF-M8X **12**
2.1 Požadavky na multikoptéru . . . 12
2.2 Návrh prototypu . . . 13
2.3 Realizace prototypu . . . 14
2.3.1 Vadná baterie . . . 14
2.3.2 Jádro těla . . . 14
2.3.3 Uchycení ramen . . . 15
2.3.4 Použití fosforbronzu . . . 15
2.3.5 Distribuční síť . . . 16
2.4 Letové testy . . . 16
2.5 Shrnutí chyb . . . 18
2.5.1 Odolnost pantů . . . 18
2.5.2 Tuhost bateriového patra . . . 19
2.5.3 Absence podvozku . . . 19
2.5.4 Absence ochrany avioniky . . . 19
2.6 Plány do budoucna . . . 19
2.6.1 Podvozek . . . 19
2.6.2 Ochrana avioniky . . . 20
2.6.3 Vibrace motorů . . . 20
2.6.4 Osvětlení . . . 20
2.6.5 FPV kamera . . . 20
2.6.6 Zvětšení těla . . . 20
2.6.7 Baterie a upevnění . . . 21
2.6.8 Uchycení ramen . . . 21
2.6.9 Testovaní na platformě . . . 22

2.6.10 Získání certifikace 22

3 Měření elektrického pole **23**
3.1 Plány na prototyp 23
3.2 Plány do budoucna 23

Závěr **25**

Seznam použité literatury **26**

Seznam obrázků **27**

Úvod

Drony a především multikoptéry v poslední době nabývají na popularitě. Tento fenomén způsobuje, že objevuje spoustu cenově dostupných multikoptér, které jsou velmi často nekvalitní a výrobci se nezabývají následky. Na opačném straně spektra jsou velké komerční drony, které často využívají filmová studia. Proto tyto drony jsou často cenově nedostupné. Cílem práce je vytvořit spolehlivé tělo k dronu, který by se vyrovnal konkurenci a zároveň byl levný na údržbu a bezpečný při například selhání motoru.

V druhé polovině bych chtěl vyvinout systém, který by mohl pomáhat odborníkům v oboru sledovat hodnoty elektrického pole v okolí výskytu bouřek a elektrického vedení. Tyto měření se dělají pouze na zemi a kvůli nepřístupnosti terénu se tato měření málokdy používají například pro hledání chyby v elektrickém vedení. Díky tomuto systému by se mohly výrazně snížit časy potřebné k nalezení chyby a tím i šetřit náklady spojené s opravami vedení.

1. První prototyp

1.1 Výběr komponentů

Z velkého množství motorů jsem nakonec zvolil klony motorů od DJI. Konkrétně motory Readytosky 2212 900kv. Čtyřmístné číslo 2212 udává rozměry statoru motoru. V tomto případě 22 mm v průměru a 12 mm na výšku. Hodnota kv je smyšlená modeláři. Jedná se o počet otáček za minutu na jeden volt, tedy v tomto případě by má motor 900 otáček za minutu při 1 voltu a 2700 na 3 voltech atd.. To jsou ale jen teoretické hodnoty a při přidání vrtulí se otáčky rapidně snižují, což nás přivádí k výběru vrtulí. Byli zvoleny vrtule 1045, kde čtyřmístné číslo opět uvádí velikosti. V tomto případě mám vrtule 10 palců v průměru a úhel stoupavosti 4,5°.

Zvolení vrtule je velmi důležité, protože při vybrání moc velké vrtule motor velmi rychle ztrácí otáčky a tím i tah, který je u multikoptéry jedinou silou působící proti gravitaci. V opačném případě, kdy vrtule zvolena příliš malá, tak motor přichází o potenciální tah, který by mohl generovat. V extrémních případech se může motor, kvůli malé vrtuli točit tak rychle, že se objeví vakuové kapsy na vršku profilu listů a otáčky se začnou extrémně zpomalovat. Pro tento efekt mají vrtulová letadla velmi omezenou maximální rychlost.

Kombinace motorů 2212 a vrtulí 1045 se stala velmi populární díky rozmachu DJI dronů a proto nebylo těžké sehnat tyto díly. Dále byli použity ESC s maximálním proudem 30A, což odpovídalo specifikaci motorů. ESC je zkratka pro "Electronic Speed Controller". Ten ovládá otáčky a umožňuje motoru se především roztočit. Pro pohon dronů se totiž používají tzv. "brushless motory"ve zkratce BLDC. Tyto motory neobsahují uhlíky, které by přenášely proud na rotor a tím jsou teoreticky bez údržbové i při vysokých operačních otáčkách. Jejich nevýhoda je že potřebují ovládací elektroniku k tomu, aby operovaly a tu zajišťují již dříve zmíněné ESC, které posílají pomocí mosfetů impulzy do 3 fází motoru v dané intervaly. Tyto intervaly mění svoji délku v závislosti na požadovaném výkonu.

Také byla zvolena baterie. Konkrétně technologie LiPo 3S1P, 11,1 V, 5000 mAh, která mohla dronu poskytnou dobu letu na necelých 5 minut, což by stačilo pro testovací lety. Později by tato hodnota byla navýšena počtem paralelních baterií.

Jako poslední byl výběr kontroléru. První návrh počítal s vytvořením vlastního kontroléru, který měl být založen na procesoru STM32. V průběhu vývoje prvního prototypu jsem návrh na sestavení vlastního kontroléru zavrhl a rozhodl se použít Pixhawk 2.4.8. Což je kontrolér založený na stejném procesoru, ale obsahující firmware pro kontrolu bezpilotních strojů a vybaven řadou senzorů potřebných k letu dronu.

1.2 První návrh

Při vývoji multikoptéry je nejdůležitější rozvrhnout jaká má být hmotnost dronu. Od tohoto data se později odvíjí zvolené motory, vrtule, ESC a následně baterie. Můj první návrh dronu byl inspirován komerčním dronem Sky Hero Spyder 6, což hexakoptéra s asymetrickým tělem, které mě zaujalo. Tento tvar těla zbytečně zesložiťoval vývoj multikoptéry, ale kvůli estetické části jsem tvar těla zachoval.

Obrázek 1.1: První nákres vzhledu těla dronu.

O těla dronu bylo požadováno, aby byl snadný transport a uskladnění. Proto nákres *(viz. obrázek 1.1)* obsahuje také návrh na složení ramen, což by dronu umožňovalo složení do podélného tvaru a tím splnilo požadavky.

Ramena měly v extrémních pozicích držet pojistky, které by rameno ukotvily pomocí děr v plátech ve středu dronu. Čtyři přední ramena by se otáčela dopředu ve směru letu a zbylá dvě k zadní části dronu.

1.3 Realizace návrhu

1.3.1 Kontrola a testy komponentů

27. dubna 2018: Přišly první díly a tím začala realizace dronu. Začal jsem testování motorů a ovládáním ESC pomocí Arduina UNO. Tyto testy byly velmi úspěšné a naučil jsem se základní principy ovládání ESC, jejich kalibraci a otáčení směru motorů. V té době také přišli vrtule k motorům, ale kvůli mé chybě měli listy rozměry pro jiný unašeč.

16. června 2018: Došli zbylé díly *(viz. obrázek 1.2)*. Otestoval jsem tah motorů. V té době jen odhadem, protože jsem neměl "Load sensor", což blok

hliníku s narušeným středem v podobě díry, která se pod tlakem/tahem ohýbá. Na jedné straně je přidána sada rezistorů, které ohnutím lehce mění svůj odpor. Tím je možné měřit reálný tah motoru. Po testu začala fabrikace těla dronu.

Obrázek 1.2: Hrubý odhad rozměrů dronu.

1.3.2 Jádro dronu

Obrázek 1.3: Jedna z desek jádra těla.

Začala výroba desek, které tvoří jádro celé multikoptéry. Byly vytvořené z jednoho kusu plechu hliníku *(viz. obrázek 1.3)*. Tento plech je recyklovaný kryt ladícího kondenzátoru pro vysokofrekvenční svařovací zařízení. Rozměry byly použité z návrhu dronu ve FreeCADu, aby vycházely úhly složení ramen a rozestupy

jednotlivých motorů. Do plechu byli poté vyvrtány díry pro upevnění avioniky, ramen, baterie a distribuční desky. Návrh se nenávratně ztratil při poškození disku. Kvůli neintuitivnímu designu jsem od této doby FreeCAD nikdy nepoužil.

1.3.3 Upevnění motorů

Výroba upevnění motorů byla nejnáročnější části stavby prvního prototypu. Celí díl je vytvořen z jednoho kusu hliníkové kulatiny. Proces začal zarovnáním povrchu kulatiny na soustruhu. Pro výrobu poloviny dílu, který je přímo spojen s motorem *(viz. obrázek 1.4)* byl použit následující proces.

Poté byly jednotlivé sekce odříznuty na pásové pile. Polotovary byly jednotlivě soustruženy z obou stran, byla přidána středová díra a byly vyznačeny vodící linky pro díry, které jsou viditelné na obrázku. Poté byly upevněny do přípravku na uchycení a pomocí frézy byla jedna strana seříznuta pro stabilnější spojení. Při této části procesu jsem u jednoho dílu provedl špatně odhad řezací rychlost a díl byl nevratně poškozen. Tyto poškození neomezovali funkčnost dílu a proto byl dále použit. Následně byly na stojanové vrtačce vyvrtány díry pro uchycení motoru a spojení s druhým dílem. Jako poslední část procesu bylo za pomoci závitníku vytvořen závit v dírách pro upevnění druhého dílu. Tyto díry byly pro tento účel od 0.5 mm menší. Všechny díry na upevnění motoru byly rozměru M3, pro jednoduchost při údržbě a pro velikost děr v motoru.

Obrázek 1.4: První upevnění motoru.

Výrobní proces použitý pro sekci spojující rameno s upevněním motoru byl jednodušší. Kulatina byla zmenšena na průměr 27,955 mm, aby přesně zapadla do vnitřního průměru hliníkové trubky tvořící rameno o průměru 30 mm a tloušťce stěny 1 mm. Byli vyvrtány díry M3 pro spoj k upevnění motoru a díra M5 pro vývod drátů k motoru. Jako poslední část byly vyvrtány díry pro spojení k trubce. Díry byly odměřený po 120° od středu trubky a byl do nich vytvořen závit M3. Celí výrobní proces upevnění motorů zabral 2 týdny běžné pracovní doby.

1.3.4 Distribuční síť

Distribuční síť má za úkol rozvádět elektřinu pro všechny komponenty multikoptéry, dnes je také standardem i měření aktuálního napětí baterie, aby pilot věděl kolik zbývá kapacity baterie. Distribuční síť jsem vyrobil z kuprexitové desky *(viz. obrázek 1.5)*. Pomocí leptací jsem na spodní straně desky vytvořil potřebné cesty. Deska obsahovala přímý rozvod proudu pro jednotlivé motory, vypínatelný stabilizátor napětí na 5 V pro kontrolér a avioniku a jednoduché měření napětí baterie pomocí odporového děliče.

Pro absenci některých funkcí jako je například měření proudu a změnu kontroléru na Pixhawk 2.4.8. Jsem zakoupil běžně používanou distribuční desku.

Obrázek 1.5: Distribuční deska vlastní výroby.

1.4 Letové testy

4. července 2018: Byl proveden test motoru na prvním hotovém rameni multikoptéry. Průběh byl katastrofický. Pro lepší chlazení byla z ESC sundána celková izolace, aby chladič mosfetů měl přímí kontakt s hliníkovou trubkou. Pří testu se, ale spojili dvě fáze na výstupu ESC skrze hliníkovou trubku, což zapříčinilo shoření ESC a následně i motoru. Později při diagnostice škod bylo spáleno další zcela nové ESC v kombinaci se spáleným motorem *(viz. obrázek 1.6)*. Tato zdržela vývoj, kdy se čekalo na nové komponenty. Od této doby byly ESC vždy zaizolovány.

Obrázek 1.6: Diagnostika spáleného motoru.

30. února 2019: Byl proveden první letový test hotového dronu. Dron bylo těžké udržet stabilně. Poté byl omylem přepnut mód kontroléru na "Return to Land", což pro nevhodně nastavený Pixhawk znamenalo okamžitý pád. Škody na dronu byly v celku minimální. Dron přišel o dvě vrtule, u některých motorů byly utrženy konektory. Začala se projevovat chyba upevnění motorů, kdy se díky vibracím začali povolovat spojovací šrouby. To znemožnilo další letové testy s aktuálními upevnění motorů. Kvůli týmovým ročníkovým pracím byl projekt odložen na několik měsíců.

11. června 2019: Jsem navázal spolupráci s firmou ThunderFly, se kterými se podílím na vývoji vírníku TF-G1. Od nich jsem dostal doporučení tisknout upevnění motorů ze speciálního PLA materiálu (PolyMax PLA 1.75), který je na světové špičce pevných PLA materiálů. Vymodeloval jsem nové upevnění motorů v OpenSCADu. Druhý prototyp měl již odladěné všechny chyby a mohl následovat letový test.

9. srpna 2019: Po zprovoznění veškeré avioniky byl proveden letový test. Multikoptéra se nedokázala zvednout ze země. Celková váha dronu byla 4,5 kg, což by měli motory podle specifikace vznést. Později se ukázalo, že specifikace Čínských výrobců motorů nejsou pravdivé. Dron reagoval na řízení a ukazoval viditelné náklony ve směru řízení. Jeden z motorů vydával výrazný zvuk, u kterého

se do teď nepodařilo zjistit příčinu. Po tomto testu byl vývoje tohoto dronu zastaven pro jeho fundamentální chyby, které jsou podrobněji popsány v další sekci. Komponenty použité na tomto prototypu jsou aktuálně používány na běžném tělu drona od DJI model F450 pro cvičení pilotování multikoptér.

1.5 Shrnutí chyb

První iterace dronu obsahovala mnoho chyb, které byly způsobené nezkušeností v oboru a špatnou specifikací dodanou od Čínských výrobců motorů. Zde jsou vypsány ty nejzásadnější.

1.5.1 Váha konstrukce

Díky použití hliníkové konstrukce s ocelovými šrouby byla konstrukce příliš těžká. Její čistá váha bez komponentů byla 2 kg, což je pro dron této velikosti nepřijatelné a váha by se měla pohybovat v řádech desítek maximálně stovek gramů.

1.5.2 Specifikace motorů

Nejzásadnější problém byla chybná specifikace motorů dodaná od výrobce. Toto je bohužel běžná praxe. Výroba BLDC motorů se vyskytuje pouze v Číně a tím si koncový zákazník nemůže moc ověřit kvalitu vyrobených motorů. Výrobci nejen mnohdy nekontrolují kvalitu, ale také falšují specifikace, aby prodali více kusů výrobku. Další problém je, že díky absenci kontroly kvality motory stejného modelu mají rozdílné parametry kus od kusu. Tento fenomén jde aplikovat na většinu výrobků pocházejících z Číny.

1.5.3 Přitížení konektorů

Problém přetížení konektorů jsem si na začátku vývoje neuvědomoval. Dron používá konektor XT60 pro připojení baterie. Tento konektor má specifikaci přenášení 60 A trvalého proudu a 120 A nárazového proudu. Dron se vyskytuje 6 motorů s maximálním proudem 30 A, což znamená, že dron potřebuje 180 A trvalého přísunu proudu, takže je specifikovaná hodnota překročena 3 krát. Toto je mezi menšími drony běžná praxe, která může vést k roztavení konektoru a pádu multikoptéry.

1.5.4 Zajištění ramen

Pro zajištění ramen dron používá šrouby upevněné skrz horní plech jádra a horní stranu ramena. Toto řešení způsobuje postupné zvětšení jistících děr a tím zvětšení vůle, ve které se rameno může pohybovat. Také to zvětšuje dobu, která je potřebná k přípravě na let. Dále sklápění ramen v horizontálním směru je prostorově neefektivní.

1.5.5 Složitost údržby

Kvůli umístění ESC do vnitřku ramen je prakticky nemožné je udržovat, či kontrolovat. Proto je také složitá výměna motorů nebo změna jejich směru otáčení. Kontrola spojů v distribuční síti je také téměř nemožná. Avionika je také díky způsobu přivedení ovládacích signálů příliš blízko distribuční síti, což způsobuje nechtěné rušení.

1.5.6 Množství nákladu

Dalším zásadním problémem, kvůli kterému nemělo smysl upravovat návrh první multikoptéry, byly jeho možnosti nákladu, který může dron unést a dobu letu, kterou může teoreticky dosáhnout. Dron by totiž mohl teoreticky nést nějakou lehkou akční kameru s dobou letu kolem 10 minut, což stačí pro většinu uživatelů dronů. Pro mé nadcházející projekty je tato skutečnost nepřijatelná.

1.6 Karbonová verze

Během čekání na nové komponenty také vznikla budoucí iterace hexakoptéry *(viz. obrázek 1.7)*, která měla být vyrobena převážně z uhlíkového vlákna, která by snížila hmotnost konstrukce, což by vedlo k vyřešení hmotnostního problému, aby se dron mohl vznést ze země, ale nemohlo by příliš navýšit množství nákladu, který může dron unést a proto se tento karbonový prototyp kromě vrtulí nikdy neuskutečnil.

Obrázek 1.7: Poslední render karbonového prototypu.

2. Prototyp TF-M8X

2.1 Požadavky na multikoptéru

Jak již v předchozí kapitole bylo zmíněno hlavním požadavkem od nové multikoptéry bylo prodloužení doby letu a možnosti nákladu. Nová multikoptéra TF-M8X je proto vybavena 8 motory Tarot 4008 330kv, které spolu se skládacími uhlíkovými vrtulemi 18x6.5 jsou schopny společně vygenerovat 24 kg čistého tahu.

Dále přetrvávaly další požadavky, mezi které patřila jednoduchá údržba, takže jednoduchý přístup ke všem komponentů dronu. Také jednoduchá výroba byl velký požadavek. Výroba prvního prototypu zabrala měsíce. TF-M8X měl proto být z velké většiny tisknutý z PolyMaxu *(viz. obrázek 2.1)*, což by dovolovalo rychlou stavu a opravu prototypu. 3D tisk také dovoluje tisknout složitější tvary dílů, díky kterým je jednodušší přístup k jednotlivým komponentům multikoptéry, také tiskne relativně přesné a konzistentní díly, což eliminuje lidskou chybu při výrobě dílů.

Obrázek 2.1: Fotodokumentace tiskové struny PolyMax.

Jednoduchý transport byl také velkým požadavkem. Multikoptéra v takovém měřítku se dá jen velice těžko transportovat. Nový prototyp musel obsahovat nějaký jednoduchý a spolehlivý skládací mechanismus.

2.2 Návrh prototypu

U nového prototypu bylo pro splnění požadavků použito co nejvíce tisknutých dílů, které byly pro vyztuženy železnými šrouby pro překonání fundamentálního problému s 3D tiskem, kdy pevnost mezi vrstvami je několikanásobně menší než pevnost v jiných osách. Kromě tištěných dílů a spojovacího materiálu byli použity opět hliníkové trubky pro jejich poměr pevnosti, hmotnosti a hlavně ceny. Tentokrát byl použit menší průměr trubek, což rapidně snížilo jejich výslednou hmotnost.

Tělo dronu se změnilo na zcela symetrické, což velmi ulehčilo vývoj, zjednodušilo vyvážení a zmenšilo počet potřebných dílů *(viz. obrázek 2.2)*.

Obrázek 2.2: Poslední render TF-M8X.

Dále ve vyskytl problém s napájením celé multikoptéry. Dron se měl podle požadavků udržet déle ve vzduchu. To znamenalo použít větší baterii. Uvažovalo se nad použitím běžných olověných baterii pro prototypovou verzi, což by velmi snížilo cenu. Tento nápad byl zavrhnout, protože se nevyrábí baterie, které by parametricky vyhovovaly. Baterie musela mít výstup 24 V. Články s touto voltáží se přestávají finančně vyplácet a překračují hmotnostní limit, který je multikoptéra schopna vynést. Nakonec byla vybrána největší komerčně prodávaná LiPo baterie od firmy Tattu (6S1P, 22,2 V, 22 Ah), která je teoreticky schopná kontinuálně dodávat 550 A a dronu by měla poskytnout bez zatížení 20 minut letu.

Jméno prototyp TF-M8X vzniklo ve spolupráci s ThunderFly, kdy M značí multikoptéru, 8 počet ramen a X souměrnost tvaru multikoptéry. V rámci problematiky názvosloví dále vznikl samostatný dokument, který se tímto problémem zbývá.

2.3 Realizace prototypu

2.3.1 Vadná baterie

Při koupi baterie pro prototyp se po naměření voltáže ukázalo, že baterie má celkové napětí jen 6,93 V *(viz. obrázek 2.3)* místo 22,2 V a na článcích se napětí pohybovalo v rozmezí od 1,5 V až 0,9 V, přičemž je LiPo bateriích známo, že pokud na článku klesne napětí pod 3,7 V jeho kapacita nevratně klesá. Při tomto napětí je i nebezpečné baterii nabíjet. Obchod uznal pochybení při uskladnění a baterii vyměnil.

Obrázek 2.3: Měření voltáže vadné baterie.

2.3.2 Jádro těla

Jádro těla TF-M8X tvoří několik pater zaměřené na různé funkce multikoptery potřebné k letu. Patra jsou tvořena tištěnými díly, které jsou propojena distančními sloupky, které zajišťují pevně spojení mezi patry.

1. patro slouží k připevnění veškeré avioniky pomocí suchého zipu. Toto řešení je výhodné pro jednoduché výměny komponentů na dronu. Je zde umístěn Pixhawk, přijímač vysílačky, transreceiver telemetrie a GPS modul.

2. patro zde je umístěn zamykací mechanismus pro zajištění ramen.

3. patro je vyplněno distribuční sítí pro jednotlivé motory a hlavně tvoří mechanickou pevnost celé multikoptéry.

4. patro má funkci nesení baterie a obsahuje držáky ramen ve složené podobě.

2.3.3 Uchycení ramen

Pro zamykaní ramen v pozici pro let bylo v první iteraci prototypu zajištěno pomocí otáčecího kruhového zámku *(viz. obrázek 2.4)*. Při prvním testu se ukázala velká nevýhoda tohoto návrhu, kdy bylo pro zamknutí všech ramen bylo potřeba minimálně 5 lidí, což bylo nepřijatelné. Bylo jasné, že zamykací mechanismus musí být nezávislí na ostatních ramenech.

Obrázek 2.4: První prototyp zamykacího mechanismu.

2.3.4 Použití fosforbronzu

Jelikož dron má s vrtulemi více než 2 metry v průměru, tak je nezbytné, aby se dron skládal. Jinak není ho není možné ani naložit do auta. Proto dron má na každém rameni pant pro složení do válcovitého tvaru. Tyto panty jsou díky délce páky extrémně namáhané. Proto vyniklo fosforbronzové vyztužení na spodku hlavního patra. Fosforbronz není moc známá slitina a je velmi těžká k sehnání, ale byla stvořena právě pro toto použití. Fosforbronz je velmi odolný proti napínaní i při velmi malých tloušťkách. Na dronu je použit jako prvek ulehčující namáhaní plastových pantů. Při vztyčení ramen dojde k jeho natažení vůči ostatním ramenům a společně tvoří síť, která roznáší síly do celého těla dronu *(viz. obrázek 2.5)*.

Obrázek 2.5: Fosforbronzové vyztužení ve složeném stavu.

2.3.5 Distribuční síť

Nové zapojení multikoptéry vyžaduje distribuci k 8 motorům o celkovém výkonu 4 kW, což je kontinuální průtok 240 A, což je problém pro jakýkoliv konektor.

Na multikoptéře jsou konektory AS150 a XT150. Rozdílný typ konektorů je použit pro zabránění náhodného přepólování uživatelem. Zároveň je použit konektor AS150, který je speciálně navrhnut, aby při zapojení nedošlo k zajiskření tzv. "anti-spark". Tyto konektory jsou pozlacené a navrhnuty na 150 A kontinuálního proudu.

Konektory pro vyšší proudy sice existují, ale nedají se použít na multikoptéře kvůli hmotnosti a velikosti. Takže problém s přetížením konektorů je stále přítomen. Existuje, ale jednoduché řešení, které je rozepsané v Plánech do budoucna.

Místo kuprexitové desky je zde pro distribuci použit pár měděných plátů, které jsou tyto ohromné proudy schopny přenést.

2.4 Letové testy

18. prosince 2019: Byl prototyp konečně připraven k letu. V terénu jsme zahájili předletové kontroly a přípravy *(viz. obrázek 2.6)*. Úspěšně jsme nakalibrovali senzory a spárovali vysílačku a telemetrii. Díky chybě v designu se nám nepodařilo nakalibrovat motorová ESC. Pro kalibraci je potřeba odpojit ESC moduly od zdroje, kdy kontrolér je stále zapnut a vysílá signál. To nebylo možné, protože spojení bylo ukryto ve středu těla dronu a tím nemožné odpojit od zbytku dronu. Proto musel být let odložen. Dále se také vyskytly problémy s armováním Pixhawku a dále byl Pixhawk 2.4.8 vyměněn za CUAV v5 s novým telemetrickým a GPS modulem.

Obrázek 2.6: Předletová příprava TF-M8X na první vzlet.

26. února 2019: Večer před letem byly provedeny všechny kontroly a dron byl připraven k prvnímu letu. Následující den byla podle plánu multikoptéra připravena k letu. 26.2. vanul silný nárazový vítr z Jihozápadu. Dále report, který byl vytvořen po nehodě:

Havárie

Povětrnostní podmínky: 13°C, Oblačno, Silný nárazový vítr
Log: https://logs.px4.io/plot_app?log=76609a8d-23f4-4a84-83bf-e362c021d81e
Možné příčiny: Silný nárazový vítr, Špatné nastavení Pixhawku, Nezkušený pilot, Otáčení motoru jiným směrem
Škody: Viditelně spálené 4 motory, polámané některé PLA části, zbytek dílů je třeba otestovat.
Průběh: Při přidání plynu se dron překlopil na záda. Při dopadu na zem se utrhl ze suchého zipu a vypojil se RC přijímač (T+1:05.5), což znemožnilo disarmovat Pixhawk. Podle nastavení se potom Pixhawk přepnul ze Stabilized módu na Return to Land (T+1:06.4), což zapříčinilo spálení motorů při kontaktu se zemí *(viz. obrázek 2.7 a 2.8)*.

Obrázek 2.7: Jeden ze spálených motorů.

Obrázek 2.8: Jeden z grafů ukazující ovládání jednotlivých ESC.

2.5 Shrnutí chyb

2.5.1 Odolnost pantů

Největší nevýhodou aktuálního designu je provedení pantů. Při manipulaci s panty dochází opotřebení spoje. Proto je potřeba přidat kovové usazení ve vnitřku pantu. Ideálně z mosazi, kde nebude docházet takovým tempem k opotřebení jako je to u stávajícího plastového.

2.5.2 Tuhost bateriového patra

Aktuální chybou bateriového patra je množství pohybu, které může konat. Tento problém je jednoduché vyřešit přidáním tisknutelných sloupků, které budou umístěny kolem stávajících distančních.

2.5.3 Absence podvozku

Velkým aktuálním problémem je absence podvozku. Bez toho není schopna multikoptéra samovolně vzlétnout. Proto je teď absolutní prioritou návrh provizorního podvozku, který bude tvořen hliníkovými trubkami a spojen tisknutelnými díly. Tento umožňovat vzlet i z terénu a díky němu nebude muset být oblast připravena pro vzlet.

2.5.4 Absence ochrany avioniky

Jako poslední aktuální zásadní problém je ochrana avioniky. Jak ukázala nehoda, tak při nárazu je avionika náchylná k poškození a tím způsobit další škody. Proto bude do budoucna vytvořen kolem avioniky kryt, který bude bránit jejímu poškození.

2.6 Plány do budoucna

2.6.1 Podvozek

Obrázek 2.9: Návrh nového podvozku.

Jak již bylo zmíněno jedním z plánů je přidání podvozku. Nejdříve pevného prototypového, který bude sloužit pouze pro testy a urychlení vývoje. Ale později je potřeba přidat dokonalejší podvozek *(viz. obrázek 2.9)*. Tento podvozek bude tlumit tvrdší přistání multikoptéry, které budou například způsobeny nepříznivým počasím. Bude dále uchycen na pantu, který bude za pomoci servo motoru schopen podvozek zvednout, aby nevadil zařízením umístěným na spodku multikoptéry.

2.6.2 Ochrana avioniky

Avionika by neměla být chráněna jen vůči větru nebo vodě. Jak ukázal poslední let, tak je třeba avioniku ochránit i před nárazem při překlopení dronu a tím předejít dalším škodám a snížit nebezpečí vzniklé pádem. Další faktorem, se kterým je potřeba počítat je zásah blesku. Při této skutečnosti by měla být avionika umístěna v kovové krabici pro odvedení náboje a zabránění poškození ovládání.

2.6.3 Vibrace motorů

Při testu se také objevily abnormální vybrace, které byly pravděpodobně způsobeny motory. Například multikoptéra Alta X od firmy Freefly používá vlastní unašeč, které umožňují náklon vrtule a tím zmenšuje turbulence, které vznikají při naklonění dronu. Dalším je použití lépe vyvážených vrtulových listů.

2.6.4 Osvětlení

Problém dronu je, že obtížné z dálky vidět v jakém stavu se aktuálně nachází a lety v nočních hodinách jsou nemožné. Proto budou na multikoptéru na konce ramen umístěny signalizační LED diody. Také budou přidána přistávací světla pro osvětlení terénu, který se bude vyskytovat pod multikoptérou. Tím umožní přistání.

2.6.5 FPV kamera

Dron musí být také vybaven FPV kamerou pro usnadnění letu. V České Republice je sice nelegální provádět lety bez přímé viditelnosti, ale pilotovi pomůže vidět obraz z dronu v reálném čase. Nebo může dron lítat v zemi, kde je možné lítat bez přímé viditelnosti a v takovém případě je FPV kamera nezbytnou výbavou dronu.

2.6.6 Zvětšení těla

Aktuální tělo TF-M8X je maximální velikost dílu, který je schopná moje tiskárna vytisknou. Při vývoji platformy se ukázalo, že když se vytiskne z více dílů a následně sešroubuje, tak je výsledný díl odolnější a tužší, což umožňuje navýšit velikost jádra těla dronu. To bude mít za následek snížení náporu na panty ramen. Umožní umístění dvou baterií na jedno patro a místo pro přidání podvozku přímo na základnu.

2.6.7 Baterie a upevnění

Pro prodloužení letové doby bude na multikoptéru přidána druhá LiPo baterie. Díky tomu se také vyřeší přetížení konektorů, kdy při zapojení dvou paralelních baterií se proud na konektor snížit na polovinu tedy na 120 A. A eliminuje se riziko roztavení konektoru.

Bateriové patro bude změněno na zásuvný zásobník pro dvě baterie. Baterie dostanou ochranou konstrukci, do které budou umísťovány zašupovacím mechanizmem. Tím budou baterie dobře chráněné proti poškození obalu a následné explozi. Také tím bude snížena náročnost upevňování baterie na místo *(viz. obrázek 2.10)*.

Obrázek 2.10: Návrh pro mechanizmus upevňování baterií.

2.6.8 Uchycení ramen

Aktuální zamykání ramen do letové pozice je funkční, ale není příliš spolehlivé a jeví známky opotřebení. Nový návrh počítá se zamykáním ramen pomocí jednoduchého šroubovacího mechanizmu, který bude možné utáhnout rukou a uživatel nebude muset použít nářadí k jeho zamknutí.

2.6.9 Testovaní na platformě

Pro správné nastavení Pixhawku jsou nezbytné další letové testy. Aby při nich nebyly poškozovány komponenty multikoptéry, bude dron umístěn na Stewartově platformě, která byla vyvinuta pro vírník TF-G1. Na té bude dronu zabráněno překlopení a mohou být simulovány povětrnostní podmínky. Zároveň díky logice, které uvádí platformu do pohybu nebude narušené přirozené chování multikoptéry a tím může být Pixhawk správně nastaven a nacvičeny různé situace z pohledu pilota *(viz. obrázek 2.11)*.

Obrázek 2.11: Stewartova platforma pro vírník TF-G1.

2.6.10 Získání certifikace

Také je potřeba získat certifikaci od Úřadu pro civilní letectví ve zkratce ÚCL. To je nezbytné pro lety s komerčním využitím. Dron proto musí splňovat řadu bezpečnostních opatření a s blížící se vyhláškou o dronech k nim přibude i nutnost umístění registrační značky dronu a další ochranné prvky. Také k dronu musí být sepsána příručka pro piloty a plná dokumentace multikoptéry.

3. Měření elektrického pole

3.1 Plány na prototyp

Na spodku dronu bude umístěno zařízení, které bude obsahovat rotační voltmetr, který je v zahraniční literatuře označován "electric field mill". Ten pomocí točících desek snímá aktuální intenzitu elektrického pole v okolí *(viz. obrázek 3.1)*. Tyto zesílené naměřené hodnoty by se pomocí Arduina poslaly do Pixhawku pomocí linky I^2C. Odtud se pošle telemetrií a počítač pomocí MAV-Linku dostane aktuální polohu GPS a hodnotu naměřenou senzorem. Tyto data následně graficky zobrazí ve formě heatmapy nad topografickými mapami.

Obrázek 3.1: Ukázka rotačního voltmetru.

3.2 Plány do budoucna

Dron bude se zařízením nasazen a bude součástí expedičních vozidel pro výzkum vzniku blesků. Zde bude lítat v blízkosti bouřkového mraku a měřit aktuální stav intenzity elektrického pole způsobené bouřkou. Tyto data budou napomáhat k výzkumu vzniku blesku. Také je plánované nasazení dronu jako cíleného svedení blesku. V tomto případě bude multikoptéra fungovat jako hromosvod, kdy na bude na spodku dron nést elektrický drát, který bude připojen hliníkovým ramenům. Ty budou fungovat jako plocha pro svedení blesku k zařízením umístěným na zemi pro měření vlastností blesku jako je jeho proud nebo ionizu-

jící záření, které vznikne v okolí. Pro toto použití máme již domluvené testovaní odolnosti multikoptéry po zásahu bleskem, aby jsem zjistili, co se s dronem poté stane. Tato metoda se již používá v kombinaci s vystřelováním raket.

Obrázek 3.2: Ukázka svedení blesku pomocí rakety.

Závěr

Tento projekt byl v několika ohledech velice úspěšný. Dokázal prozkoumat mnoho úskalí při navrhování a stavbě vlastní multikoptéry. TF-M8X je platforma, na které je množné v budoucnu velice úspěšně stavět a je možné ji použít k množství aplikací a bude dále rozvíjena.

Měření elektrického pole se bohužel nepodařilo dosáhnout, kvůli problémům spojených s vývojem prototypů multikoptéry. Ale tento koncept je stále reálným a v budoucnu může být na tento projekt navázáno.

Seznam použité literatury

Research Gate [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/figure/Electric-field-mill-EFM-sensor-a-Configuration-b-photograph_fig2_332177087

ČVUT - Fakulta elektrotechnická [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/ekologie_a_ekotechnika/lab/elp/

Wired [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://www.wired.com/2015/06/the-lightning-machine/

Wikipedia [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform

Pixhawk dokumentace [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk_series.html

Foxtech Parametry motorů [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://www.foxtechfpv.com/4008-martin-brushless-motor-tl2955.html

Fórum Fusion 360 [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://knowledge.autodesk.com/support/fusion-360

OpenSCAD dokumentace [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://www.openscad.org/documentation.html

QGroundControl dokumentace [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://docs.qgroundcontrol.com/en/

ThunderFly [online]. [1.3.2020]. Dostupné na: https://www.thunderfly.cz/

Seznam obrázků

1.1 První nákres vzhledu těla dronu. 5
1.2 Hrubý odhad rozměrů dronu. 6
1.3 Jedna z desek jádra těla. 6
1.4 První upevnění motoru. 7
1.5 Distribuční deska vlastní výroby. 8
1.6 Diagnostika spáleného motoru. 9
1.7 Poslední render karbonového prototypu. 11

2.1 Fotodokumentace tiskové struny PolyMax. 12
2.2 Poslední render TF-M8X. 13
2.3 Měření voltáže vadné baterie. 14
2.4 První prototyp zamykacího mechanismu. 15
2.5 Fosforbronzové vyztužení ve složeném stavu. 16
2.6 Předletová příprava TF-M8X na první vzlet. 17
2.7 Jeden ze spálených motorů. 18
2.8 Jeden z grafů ukazující ovládání jednotlivých ESC. 18
2.9 Návrh nového podvozku. 19
2.10 Návrh pro mechanizmus upevňování baterií. 21
2.11 Stewartova platforma pro vírník TF-G1. 22

3.1 Ukázka rotačního voltmetru. 23
3.2 Ukázka svedení blesku pomocí rakety. 24