



Středoškolská technika 2019

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

JAK LÉTÁ DRON ZA 120 DOLARŮ

Jonáš Priškin

Gymnázium Botičská
Botičská 1, Praha 2

Anotace

Tato práce se zabývá stavbou kvadkoptéry ze zakoupené elektroniky a rámu vytištěného na 3D tiskárně. Popisuje nejdůležitější komponenty, jejich funkci a účel. Uvádí informace o vlastnostech a charakteristikách jednotlivých komponent. V experimentální části zkoumá letové chování (zrychlení, rychlosti v jednotlivých osách, směr letu, výška nad zemí, ...) kvadkoptéry v závislosti na rozpětí motorů.

Klíčová slova

dron; kvadkoptéra; 3D tiskárna; 3D tisk

Abstract

This thesis deals with building a quadcopter from bought electronics and 3D printed chassis. It describes the most important components, how they work and how they are used. Features the information about properties and characteristics of each component. In the experimental part investigates the flight behaviour (acceleration, speed in each axis, direction of flight, height above the ground, ...) of the quadcopter based on the span of its motors.

Key words

drone; quadcopter; 3D printer; 3D printing

Poděkování

Tímto děkuji paní profesorce RNDr. Vlastě Sudzinové, za odborné vedení a konzultace, připomínky a nápady na zlepšení. Mému otci Ing. Janu Priškinovi, za praktické podněty a vedení v elektrotechnice. Mé matce Mgr. Sylvě Priškinové za jazykové korektury. A hlavně mé rodině za materiální podporu.

Obsah

Úvod.....	4
Přehled použitých zkratk a symbolů	5
Přehled literatury	6
Dron – definice	6
Využití dronů	6
Komponenty.....	7
Rám	7
Výpočetní jednotka	7
ESC.....	8
Motory.....	8
Vrtule.....	8
Rádio systém	9
Přenos obrazu.....	10
Telemetrie	10
Baterie.....	10
Mechanika letu	11
Rotace podle osy Z dronu	12
Rotace podle os X a Y dronu	12
Posun po ose Z.....	13
Metodika	14
Sestavení dronu	14
Návrh rámu	14
Tisk rámu.....	15
Sestavení rámu	15
Konfigurace firmwaru	19
Osazení elektronikou	19
Hardwarová konfigurace.....	20
Měření	20
Zálety a sběr dat.....	20
Výsledky a diskuse	23
Chování náklonu pitch	23
Chování náklonu roll.....	24
Fyzikální vysvětlení.....	24
Závěr.....	25
Seznam literatury	26
Seznam obrázků, grafů a tabulek	27
Přílohy.....	28

Úvod

Toto téma jsem zvolil, protože bezpilotní letadla poslední dobou získávají na důležitosti a velmi rychle se vyvíjí. Velkou motivací pro mne byla touha poznat tuto problematiku. Do práce jsem šel s nulovou znalostí tématu radiově řízených zařízení. Do podobné situace jsem se dostal, když jsem stavěl 3D tiskárnu a ze zkušenosti mohu říci, že počáteční neznalost tématu nebrání kvalitnímu poznání a umocňuje dobrý pocit ze získaných znalostí. Pro potřebu modifikovat rám kvadkoptéry pro účel experimentů mi použití 3D tiskárny v mnohém ulehčila práci. Tato práce by také nemohla vzniknout bez principu sdílení a volného šíření myšlenek a postupů opensource (viz kapitola *Výpočetní jednotka*). Firmware kvadkoptéry, konfigurační program pro sbírání dat i koncept použité 3D tiskárny jsou opensource. To mi umožnilo jakkoli modifikovat firmware pro experimentální účely, či používat návrhy ostatních, bez nutnosti platit za autorská práva.

Pro přehlednost jsem do práce zahrnul kapitolu shrnující zkratky a symboly použité napříč celou prací. Všechny zkratky jsou pro orientaci vysvětleny i v jednotlivých kapitolách.

Přehled použitých zkratek a symbolů

3D tiskárna	stroj schopný vyrábět prostorové objekty nanášením materiálu ve třech osách
1318	základní verze dronu – předozadní rozpětí motorů 13 cm, stranové 18 cm
2826	experimentální verze dronu – předozadní rozpětí motorů 28 cm, stranové 26 cm
ABS	akrylonitrilbutadienstyren, plast používaný pro tisk v 3D tiskárnách
BEC	stejnoseměrné napětí 5 V generované na ESC
C	index určující maximální proud, který je schopna vyprodukovat lithium-polymerová baterie, proud se vypočítá viz kapitola <i>Baterie</i>
CC3D	opensource výpočetní jednotka užívaná pro RC zařízení (viz kapitola <i>Výpočetní jednotka</i>)
CCW	z angl. counter clockwise, rotace motoru proti směru hodinových ručiček
CW	z anglického clockwise, rotace motoru po směru hodinových ručiček
ESC	regulátor otáček motoru řídící rychlost motoru (viz kapitola <i>ESC</i>)
FFF	anglicky fused filament fabrication, metoda výroby fyzického objektu tavením vstupního materiálu či plniva, technologie 3D tisku
FPV	z angl. first person view, živý pohled přenášený z dronu simulující pohled pilota
GPS	z anglického global positioning system, systém určující polohu přijímače pomocí soustavy satelitů
li-po	lithium-polymerová baterie
opensource	licence umožňující volné šíření, užívání, upravování a zpeněžení díla užívaná ve velkém v oblasti 3D tiskáren a RC systémů
pitch	náklon letounu kolem osy Y, projevuje se rozdílem ve výšce přední a zadní části a pohybem po ose X, tj. vpřed a vzad
PDB	z angl. power distribution board, deska distribuující elektrické napětí
RC	z angl. radio controlled, radiově řízená zařízení (auta, drony, lodě aj.)
reciever	z angl. recieve=přijímat, přijímač používaný v RC sestavě (kapitola <i>Reciever</i>)
roll	náklon letounu kolem osy X, projevuje se rozdílem výšky pravé a levé části a pohybem po ose Y
throttle	rychlost rotace motorů, projevuje se změnou velikosti tahů motorů a tím i rychlosti rotace motorů, respektive rychlosti pohybu drona
transmitter	z anglického transmit=vysílat, vysílač používaný v RC sestavě (kapitola <i>Transmitter</i>)
yaw	rotace letounu kolem osy Z, projevuje se zatáčením bez změny výšky či náklonu

Přehled literatury

Dron – definice

Jako dron je bráno jakékoli bezpilotní letadlo tzn., pilot není na palubě stroje. „Dron je především bezpilotní letecký prostředek nebo bezpilotní letecký komplexní systém, který umožňuje let bez jakékoli posádky na palubě.“ (Karas, a další, 2016 str. 11) V mé práci se jedná o kvadkoptéru, koptéru se čtyřmi motory s vrtulemi ovládanou ze země radiovým signálem a přenosem okamžitého obrazu z paluby na zem tzv. FPV (first person view, česky pohled z první osoby, viz kapitola *Přenos obrazu*). „Koptéry jsou létací stroje, udržující se ve vzduchu pomocí rotace jedné nebo více vrtulí.“ (Bistrický, 2013 str. 7)

Využití dronů

Drony, respektive bezpilotní stroje či letadla, mají široké možnosti využití díky kombinaci jednoduchosti ovládání a kompatibilitě s velkým množstvím přístrojů. Kamery, meteorologické senzory, armádní prostředky a přístroje měřící radioaktivitu jsou jen příklady přístrojů, které mohou být instalovány na bezpilotní letadla. Původně byla bezpilotní letadla využívána za války na mapování pohybu nepřátel, výzkumu terénu, nesení bomb a zbraní, či jako vzdušné terče pro nácvik střelby. „Tak tomu bylo třeba u bezpilotních prostředků s přezdívkou *Včelí královna*, které sloužily v 40. letech 20. století jako cvičné terče pro britské královské námořnictvo.“ (Karas, a další, 2016 str. 16) V dnešní době mají v armádě bezpilotní prostředky využití jak v monitorování prostoru, tak v nesení bomb a dálkově řízených střel. „Takovým nejznámějším vojenským dronem je *MQ-1 Predator*, který poprvé vzlétnul v roce 1994 a využívá ho *Letectvo Spojených států*.“ (Karas, a další, 2016 str. 17) Česká republika používala stroj *Sojka III*. „Byla určena primárně pro vzdušný průzkum v reálném čase a monitoring... v období od října 2000 až od svého vyřazení v roce 2010.“ (Karas, a další, 2016 str. 17)

Drony se využívají i ve filmovém průmyslu. Kameramanům dávají možnosti natáčet velmi levně scény ze vzduchu, což bylo dříve možné pouze pomocí helikoptér či malých letadel, jejichž provoz byl a stále je mnohonásobně dražší.

Využití dronů pro technickou kontrolu dopravních letadel navrhly aerolinky, respektive výrobci letadel na konci roku 2016. Toto použití by mělo několik výhod. V hůře dostupných, či vysoko položených místech by drony operovaly lépe než lidé. Drony a jejich provozní čas je relativně levný, a pokud fungují na předem naprogramovaném postupu, odpadá cena operátora. Při kontrolách by se dopouštěly méně chyb než lidé a byly by schopny přesněji odhalit i menší závady. V návaznosti na odhalení by mohly ihned nalezené nedostatky opravit.

Firmy Google a Yahoo! přišly s nápadem použít plachtící bezpilotní letadla jako vysílače internetového a telefonního signálu v oblastech se špatnou přístupností, kterými jsou pouště a hory.

Komponenty

Rám

Rám je hlavní stavebním prvkem kvadkoptéry, do kterého (popřípadě na něj) jsou umístěny elektronické komponenty (řídící jednotka, baterie, rádio systém, kamera, motory atd.). Rám musí být vyroben z lehkého, ale pevného materiálu. Ve většině levnějších kvadkoptér je užit plast. U dražších strojů jsou používány uhlíkové nebo hliníkové profily. Já používám plast ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), stejný plast jako se užívá při výrobě Lega a plastových hraček. Rám je tištěn na 3D tiskárně technologií FFF (fused filament fabrication, nepřekládá se do češtiny). Výtisk není plně vyplněný plastem, jako by byl v případě vylitku, ale obsahuje generované vnitřní dutiny. Tím je zajištěna nízká váha konstrukce s dostatečnou pevností. Sestavená velikost rámu kvadkoptéry je větší než maximální možná velikost výtisku na použité 3D tiskárně, proto je rám rozdělen na menší části, které jsou postupně tištěny v tiskovém prostoru 20x20x20 cm. Součásti jsou dohromady spojené šrouby a matkami. Toto řešení umožňuje v případě zničení jakékoli části rámu jednoduchou výměnu pouze poškozené části bez nutnosti výroby celé konstrukce.

Rám kvadkoptéry se skládá z těchto částí:

- dolní základna (uchycení výpočetní jednotky a kamery pro FPV)
- ramena přidělaná na dolní základnu (uchycení ESC a motorů)
- horní základna (uchycení receiveru, desky distribuující elektrický proud a transceiveru telemetrie)
- nožičky na spodní straně dolní základny (uchycení baterie a přistávání)
- zábrany vrtulí připevněné na koncích ramen

Výpočetní jednotka

„Mozkem“ kvadkoptéry je elektronická výpočetní jednotka. „*Spravuje řídicí signály uživatele, kombinuje je se vstupy ze senzorů a následně posílá signály na vstupy ESC.*“ (Bistrický, 2013 str. 18) Výpočetní jednotky existují ve variantách opensource nebo closedsource. Opensource výpočetní jednotky jsou vyvíjeny komunitou uživatelů a umožňují jednoduše měnit vlastnosti letounu. Je velmi jednoduché měnit firmware a přidávat další komponenty jako GPS či telemetrii. Closedsource výpočetní jednotky jsou vyvíjeny komerční firmou a neumožňují změny firmware či konfiguraci vlastních komponent. Výpočetní jednotky closedsource jsou oproti opensource mnohem stabilnější a spolehlivější. Pro účely budoucího vylepšování modelu, změny komponent a přidávání GPS je výhodné použití opensource výpočetní jednotky.

CC3D Revolution (zkráceně Revo) je opensource výpočetní jednotka určená pro RC (radio controlled, česky rádiově řízená) zařízení vytvořená na základě projektu OpenPilot. V dnešní době (únor 2018) se o vývoj stará komunita pod názvem LibrePilot. Používá 32bitový procesor a nabízí následující vstupy a výstupy:

- šest třípinových výstupů pro ESC nebo serva
- desetipinový FlexiIO (input-output), který může posloužit jako vstup z receiveru (přijímače) pro přijímání instrukcí nebo pro příjem telemetrie a GPS či jako další výstup pro ovládání serv
- čtyřpinový FlexiPort pro připojení například výstupu telemetrie

- čtyřpinový MainPort pro připojení GPS nebo satelitního receiveru. (Jewell, 2015)

Na desce se nachází také OPLink modul pro přenos telemetrie, k jeho funkci je nutné k výpočetní jednotce připojit anténu. Oproti minulé generaci tedy odpadá nutnost dalšího OPLink modulu pro přenos telemetrie. Jednotku CC3D Revolution je možné napájet stejnosměrným napětím od 4,8 V do 15 V. K napájení je možné využít vestavěné mini USB, ReceiverPort nebo pozitivní konektor na připojení serv. (Jewell, 2015).

ESC

ESC je regulátor otáček motoru, který přijímá instrukce pomocí třípinového spojení s výpočetní jednotkou. Třípinový konektor obsahuje signální vodič, negativní vodič a BEC. BEC je stejnosměrných 5 V generovaných na ESC buď rotací motoru, nebo přímou transformací 12 V z baterie. „Další úlohou BEC-u je napájet řídicí jednotku a komunikační rádio ještě chvíli po tom, co v hlavní baterii nezůstane dostatek energie pro napájení motorů. Letadla jsou tak stále ovladatelná a šikovní piloti s nimi dokážou bezpečně přistát.“ (Bistrický, 2013 str. 17) Z ESC vycházejí tři vodiče pro napájení motoru. Prohozením jakýchkoli dvou vodičů pro motor dojde ke změně rotace motoru. ESC je napájené stabilními stejnosměrnými 12 V z baterie.



Obrázek 1 Schéma vodičů vycházejících z ESC a zapojených do ESC (není-li uvedeno jinak, obrázek autor)

Motory

K pohybu celé kvadkoptéry slouží čtveřice motorů typu brushless (bezkartáčkové, častěji střídavé trojfázové), které jsou napájeny ESC regulátory. Na kvadkoptěře je sestava motorů 2+2, tj. dva s rotací po směru hodinových ručiček (CW – clockwise) a dva s rotací opačnou (CCW – counter clockwise). Tyto motory jsou umístěny na kvadkoptěře k sobě křížem, stejné rotace jsou umístěny proti sobě (viz obrázky 3 až 5). U motorů se výkon udává v jednotkách KV, tyto jednotky udávají počet otáček za minutu, které motor vykoná při napětí jeden volt bez zátěže. (Pine, 2008) Nejedná se o stejnou jednotku jako kV (kilo-volt). (Pine, 2008) Motor můžeme také charakterizovat velikostí proudu, který skrz motor prochází při maximálním zatížení. Ten se pohybuje v řádech ampérů.

Vrtule

Vrtule je místo, kde se převádí rotační pohyb motoru na zdvih. Vrtule vznikla přetvořením šroubu. (Lněnička, 1996 str. 149) Vrtule je nakloněná rovina, pohybující se dvěma pohyby, rotačním okolo své osy otáčení a posuvným rovnoběžným s osou otáčení. (Lněnička, 1996 str. 149) Při rotaci vrtule se dostáváme do problému, díky tomu, že každá část vrtule má jinou obvodovou rychlost, protože je jinak vzdálena od středu otáčení. (Lněnička, 1996 str. 150) Vrtule tak musí být vyrobeny z velmi pevného materiálu, protože na body s různou vzdáleností od středu působí jiná zrychlení, a pokud by vrtule nebyla dostatečně pevná, roztržila by se,

a to by znamenalo pád letounu. U vrtule uvádíme průměr a stoupání. „*Stoupání je hodnota udávající vzdálenost, kam by měla vrtule postoupit za jednu otáčku.*“ (Lněnička, 1996 str. 150) Stoupání je ovšem teoretická veličina, vrtule je zatížena tím, co nese nebo táhne, proto nikdy nebude mít 100 % účinnost. „*Rozdíl mezi teoretickým a skutečným stoupáním nazýváme skluzem vrtule.*“ (Lněnička, 1996 str. 151)

Rádio systém

Pro přímou komunikaci instrukcí mezi zemí a kvadkoptérou se používá dvojice radiových zařízení: transmitter na zemi a receiver na kvadkoptéře, viz kapitoly *Transmitter* a *Receiver*. Komunikace probíhá jednosměrně, transmitter vysílá a receiver funguje jako přijímač. V dnešní době většina rádiových systémů pro RC zařízení operuje na frekvenci 2,4 GHz. Tato frekvence má několik výhod, „... nabízí bohatou nabídku komponent“ (Pilný, 2012) což se projevuje větším výběrem elektroniky, která operuje na frekvenci 2,4 GHz, oproti jiným operačním frekvencím. „... je tolerantnější k přenosu za mlhy a přes oblačnost než 5,8 GHz... neruší tolik příjem GPS signálu.“ (Pilný, 2012) Jako nevýhody se uvádí vysoká aktivita mnoha dalších zdrojů, které operují na stejné frekvenci a ty mohou způsobit výpadek či přinejmenším rušení signálu. (Pilný, 2012) Další nevýhodou může být zvětšující se výskyt Wi-Fi vysílačů operujících na frekvenci 2,4 GHz. Pro oddělení různých vysílačů v jednom 2,4 GHz pásmu se samotné 2,4 GHz pásmo dělí na jednotlivé kanály mírně se odchylovící od frekvence 2,4 GHz, to umožňuje provoz mnoha RC a Wi-Fi systémů bez rušení.

K ovládání kvadkoptéry se používají při přenosu signálů z receiveru do řídicí jednotky jednotlivé kanály, jiné než ve výše popsaném případě. Každý kanál předává informaci o jiném pohybu. Například při přítomnosti 4 kanálů je první kanál throttle, druhý roll, třetí pitch a čtvrtý yaw (viz obrázek 2). Případné další kanály většinou neslouží k přenosu instrukcí o změně směru, nýbrž ovládají výsuvná kola, padák, světla či serva pro pohyb kamery.

Transmitter

Pro zachycení instrukcí pilota se používá ovladač s dvěma joysticky.

1. Pravý je centrován v obou osách na střed a sám se na střed vrací. Svislá osa ovládá pitch a vodorovná osa roll viz obrázek 2.
2. Levý má na střed centrovanou pouze vodorovnou osu, svislá osa se volně pohybuje od nejvyššího k nejnižšímu bodu bez toho, aby se vracela. Necentrováná svislá osa ovládá throttle – rychlost, kterou se točí motory a dron stoupá, klesá nebo levituje. Vodorovná osa ovládá yaw a projevuje se zatáčením doleva a doprava viz obrázek 2.

V rámci jednoho joysticku se mohou pohyby na obou osách kombinovat. Ovladač dále může obsahovat další ovládací prvky, například přepínač letových režimů, ovladač serv kamery nebo ovládání podvozku.

Receiver

Na palubě kvadkoptéry přijímá receiver signály z transmitteru, rozděluje je na jednotlivé kanály a přeposílá do řídicí jednotky, která je vyhodnocuje. Receiver je většinou malá krabička s vývodem pro anténu a mnoha třípinovými konektory typu samec pro připojení konektorů pro jednotlivé kanály a připojení stejnosměrných 5 V většinou z BEC. Toto řešení umožňuje letadlu být ovladatelné, i když dojde proud v baterii a vrtule se stále točí. (Bistrický, 2013 str.

17) Tento princip se u koptér neuplatňuje vzhledem k principu jejich letu, viz kapitola Mechanika letu.

Přenos obrazu

K přenosu obrazu v přímém čase z kvadrokoptéry pilotovi na zem se používá sestava FPV (First Person View, česky pohled první osoby). Skládá se z kamery pro zachycení obrazu, transmitteru pro vyslání informace na zem, receiveru na zemi pro zachycení signálu a zařízení pro zobrazení obrazu na zemi. K přenosu obrazu FPV se užívá mnoho různých frekvencí (900 MHz, 1,2 GHz, 2,4 GHz a 5,8 GHz). (Pilný, 2012) V mé konstrukci je použita varianta 5,8 GHz, která „...neruší příjem GPS signálu... je možno provozovat s RC soupravami 2,4 GHz...je to méně obsazené pásmo...“ (Pilný, 2012)

Výkon vysílání se vyjadřuje pomocí jednotky miliwatt. V FPV se používají vysílače o výkonu od 200 mW do 2000 mW. „...v ČR je legální provoz do 1 W...“ (Pilný, 2012) Vysílače i přijímače jsou napájeny stejnosměrnými 12 V. Do vysílače se připojuje kamera s rozlišením pohybujícím se okolo 480p. Je zde možnost použít záznamovou kameru jako FPV kameru, pokud má dostatečně nízkou odezvu. Vysoká odezva, tzn. prodleva mezi natočením situace a zobrazením natočené situace na zemi, brání přesnému řízení kvadrokoptéry pouze pomocí FPV. K zobrazení FPV obrazu je možno použít stereoskopické brýle pro virtuální realitu, klasický displej, nebo převodník A/V signálu na USB. Tento převodník lze zapojit do smartphonu či počítače.

Telemetrie

Telemetrie je souborný název pro údaje o letu. Obsahuje aktuální zrychlení, náklon letounu, rychlost nebo rychlost stoupání. V oblasti bezpilotních letounů se tento termín používá také pro dvojici zařízení, která přenášejí telemetrická data z letounu na zem. Tento přenos probíhá pomocí dvojice zařízení, kde jedno je připojeno k řídicí jednotce dronu a druhé k počítači či chytrému telefonu. Tuto dvojici zařízení nelze označit jako receiver a transmitter, protože komunikují duplexně (oboustranně), proto se obě jednotky označují jako transceiver (složeno ze slov transmitter a receiver). Telemetrii lze použít i pro ovládání letounu. Když zapojíme transmitter pro ovládání dronu do transceiveru na zemi a systém správně nakonfigurujeme, výpočetní jednotka si bude instrukce brát rovnou z telemetrie na palubě a odpadá potřeba mít receiver pro příjem instrukcí a tím se sníží váha letounu.

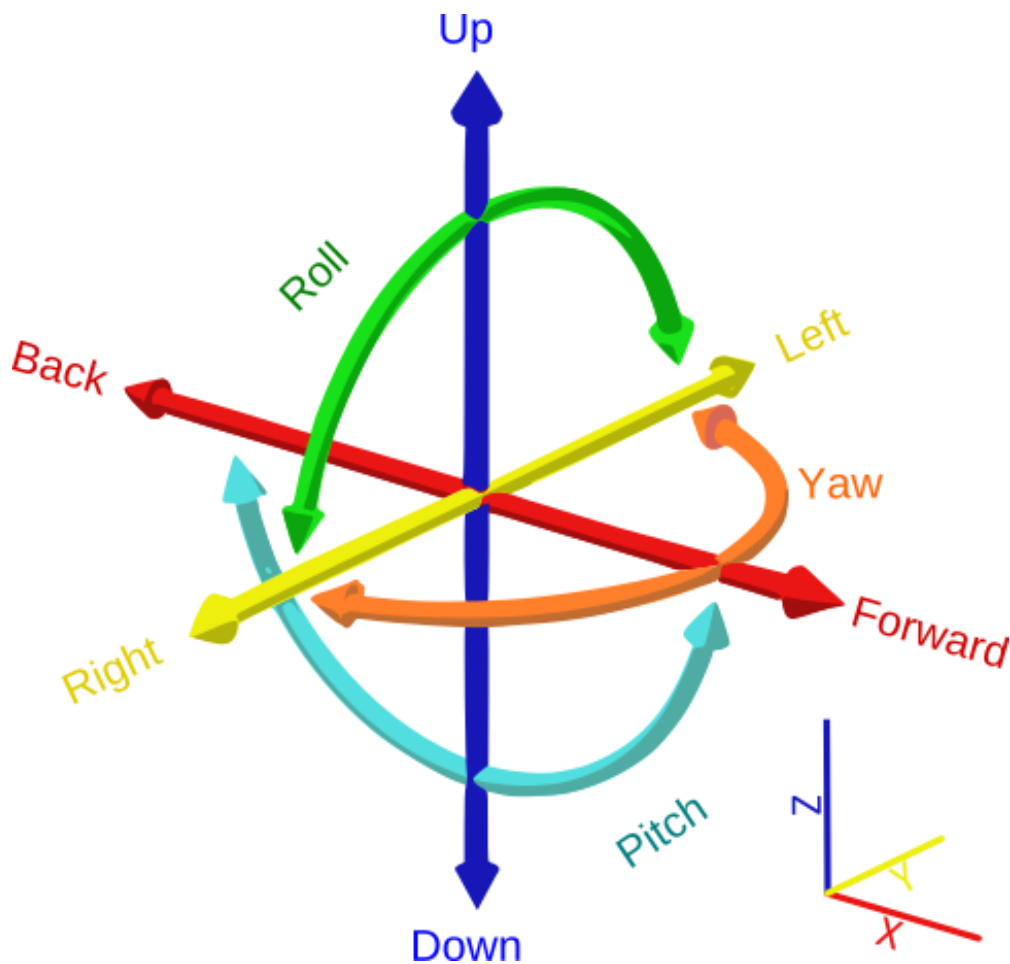
Já pro přenos používám moduly OPLink Mini, které komunikují na frekvencích mezi 430 a 440 MHz. (Jewell, 2015) Jeden transceiver je zabudovaný v jednotce CC3D Revolution a druhý transceiver je připojen k počítači pomocí USB. V na počítači běžícím programu LibrePilot se telemetrická data zobrazují a ukládají.

Baterie

Celý systém nemůže být bez zdroje energie, proto s sebou musí mít spolehlivý, vysokokapacitní zdroj stejnosměrného napětí, který se dokáže rychle vybijet a díky tomu dostatečně zásobovat na elektrickou energii náročné motory. Nejčastěji se používají lithium-polymerové baterie (zkráceně li-po), které nabízejí vysokou energetickou kapacitu při nízké váze a jsou schopné dlouhodobě poskytovat vysoký vybíjecí proud. Vybíjecí proud, který je baterie schopna vydat je udáván v tzv. indexu „C“. Tento index „C“ určuje maximální proud, který se vypočítá vynásobením indexu kapacitou baterie. „Hodnota 1C je rovna kapacitě baterky, tzn. u baterky

s kapacitou 5000mAh je hodnota $1C=5A$." (Tomeček, 2011) Pokud baterie s kapacitou 1000 mAh má index roven deseti, maximální proud je 10 a (10x1000 mA). Každá li-po baterie je složena z li-po článků, každý článek má při normálním nabití napětí 3,7 V, maximální bezpečné napětí je 4,2 V a minimální bezpečné napětí 2,9 V. (Tomeček, 2011) Při překročení těchto hranic se li-po baterie zničí. „V takovém případě hrozí nevratné zničení baterky, její nafouknutí a v krajním případě vzplanutí nebo exploze.“ (Tomeček, 2011) Články se zapojují do paralelních, nebo sériových obvodů, k docílení požadovaného napětí nebo kapacity. Počet zapojených článků se značí písmeny „S“ pro sériové zapojení a „P“ pro paralelní zapojení. Baterie s označením 2S 10C a kapacitou 3000 mAh dodává nominální napětí 7,4 V (2x3,7 V) a je schopna poskytnout proud 30 a (10Cx3000 mA). Baterie označená 2P 10C se stejnými články jako předchozí příklad má kapacitu 6000 mAh, napětí 3,7 V a dokáže dodávat proud 60 A. (Tomeček, 2011)

Mechanika letu

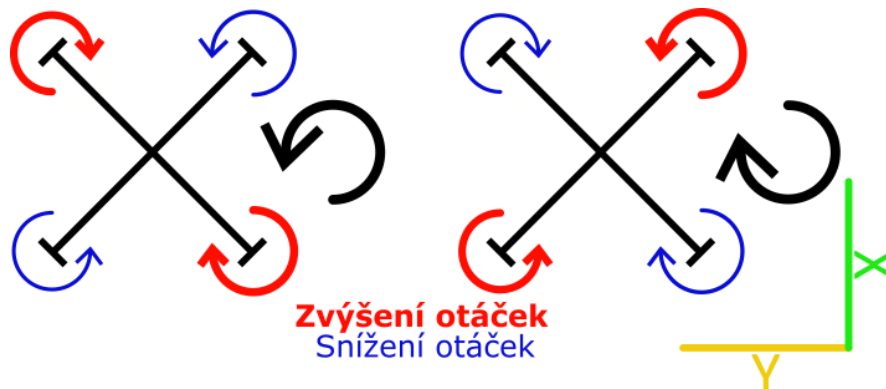


Obrázek 2 Názvy rotačních pohybů kolem jednotlivých os (Ionescu, 2010)

Pohyb dronu je velmi složitý proces založený na elektronické stabilizaci a přizpůsobování rychlostí rotace jednotlivých motorů. Dron na rozdíl od letadla není schopný létat bez výpočtů řídicí jednotky. V porovnání s letadly zde nejsou žádné klapky, směrovky či vrtule měnící sklon svých listů. Celý pohyb je uskutečňován pouze zpomalováním a zrychlováním jednotlivých motorů. Aby se změny rotací projevíly změnou směru, jsou dva motory pravotočivé a dva levotočivé. Na kvadkoptěře jsou motory se stejnou rotací posazeny diagonálně proti sobě.

Pohyb dronu můžeme rozdělit na:

Rotace podle osy Z dronu

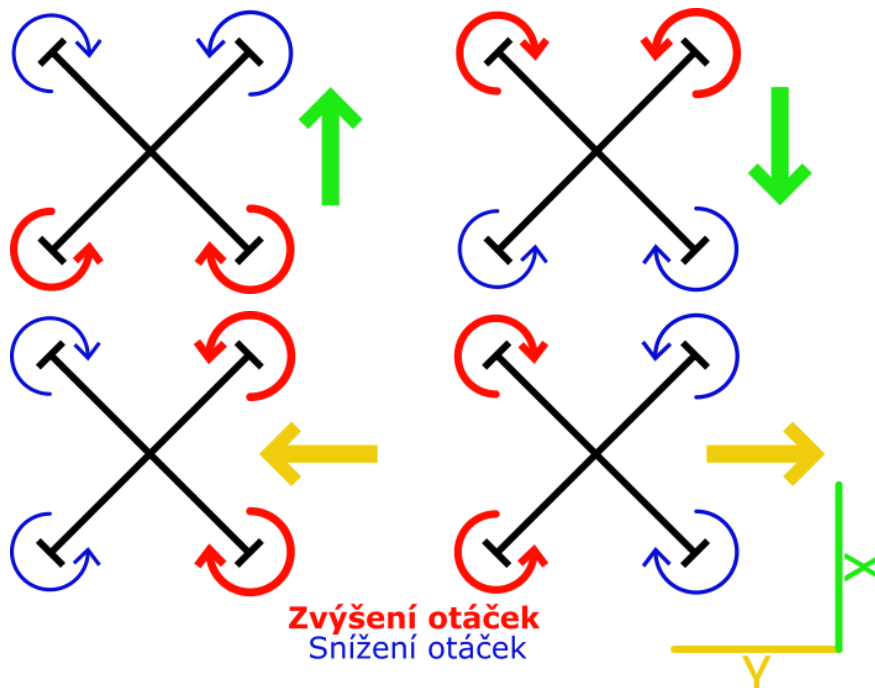


Obrázek 3 Znáznornění změn otáček motorů při rotaci kolem osy Z (černá šipka ukazuje výsledný směr pohybu)

Jedná se o pohyb, při kterém se dron natáčí podle své svislé osy Z, tento pohyb ovládáme joystickem „yaw“. Při točení doprava se zvedají otáčky motorů levotočivých, při rotaci doleva pravotočivých (viz obrázek 3). Výsledný moment síly projevující se otočením je pozitivně ovlivněn délkou ramena, tj. vzdálenost od motoru ke středu dronu. Při zvednutí otáček pouze pravotočivých motorů o stejný díl, dron začne pouze rotovat doleva. Pokud změníme rychlosti rotace i dalších motorů, pohyb nebude čistý a bude se kombinovat, stejně pokud zvedneme rychlosti otáček u obou motorů jinak, dron bude mimo rotaci v ose Z rotovat i kolem ostatních os.

(Uhlíř, 2013 str. 20)

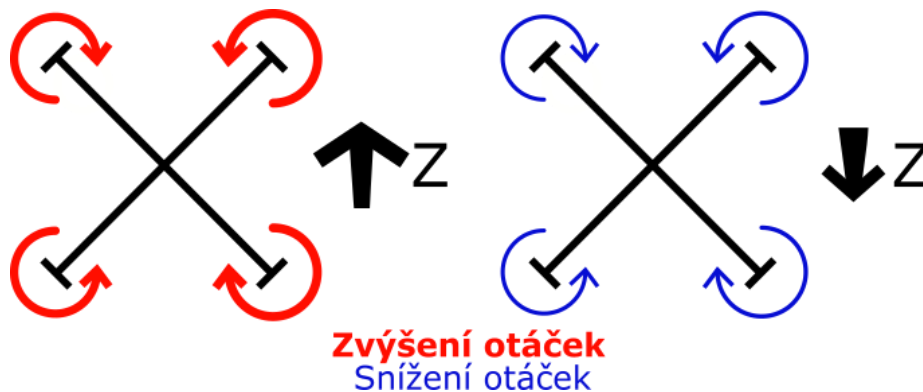
Rotace podle os X a Y dronu



Obrázek 4 Znáznornění změn otáček motorů při rotacích kolem os X (dole) a Y (žluté a zelené šipky ukazují výsledný směr pohybu)

Tento pohyb se projevuje náklonem dronu podle jeho os X a Y . Z pohledu ze země se dron posunuje v rovině XY bez změny Z . Při náklonu v ose X (roll), se dron posunuje v ose Y (doleva a doprava, viz obrázek 4). Rotaci ovládáme pomocí joysticků pro „pitch“ a „roll“. Rotace je projevem změny momentů jednotlivých ramen. Moment motoru se skládá z tahu motoru a délce ramena, respektive vzdálenosti motoru od středu konstrukce. Zvětšíme-li otáčky motorů na pravé straně, dron se nakloní na levou stranu (viz obrázek 4 situace vlevo dole). Čím delší ramena dron má, tím větší bude síla náklonu.
(Uhlíř, 2013 str. 19)

Posun po ose Z



Obrázek 5 Znárodnění změn otáček motorů při změně výšky nad zemí (černá šipka ukazuje výsledný směr pohybu po ose Z)

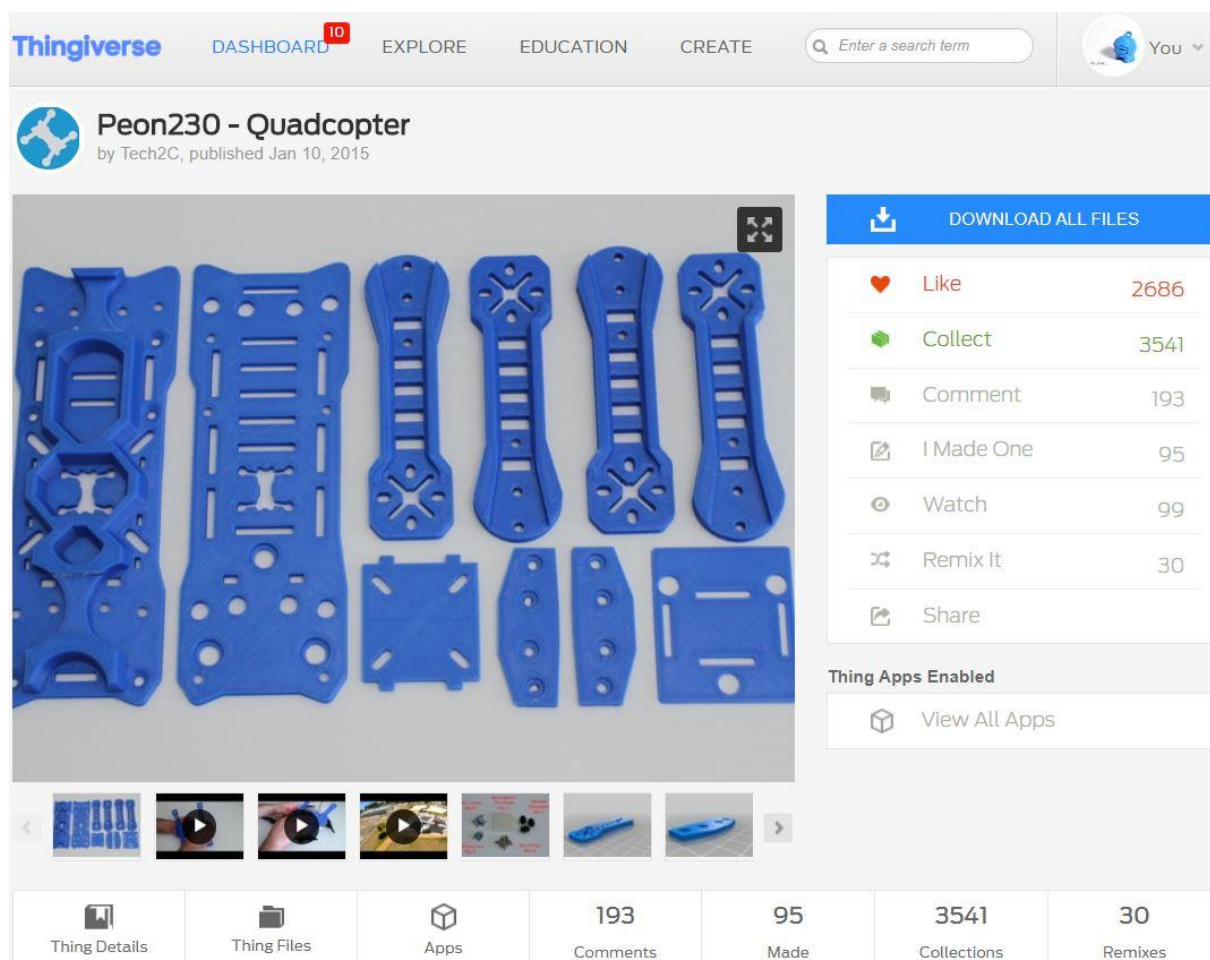
Pokud chceme změnit výšku kvadkoptéry, musíme změnit rychlosti rotace všech motorů a tím i jejich tah. Pokud zvýšíme rychlost otáček, zvětší se tah a dron začne stoupat a obráceně (viz obrázek 5). Ve chvíli, kdy nebudeme měnit rychlosti otáček na všech motorech stejně, začne se nám měnit nejen výška, ale dron začne rotovat i kolem ostatních os. Kombinují se situace popsané obrázky 3 až 5.
(Uhlíř, 2013 str. 22)

Metodika

Sestavení dronu

Návrh rámu

Celý koncept tohoto dronu jsem našel na portálu Thingiverse (Tech2C, 2015) jako projekt s názvem „Peon230 – Quadcopter“ od autora Tech2C.



Interaction	Count
Like	2686
Collect	3541
Comment	193
I Made One	95
Watch	99
Remix It	30
Share	-

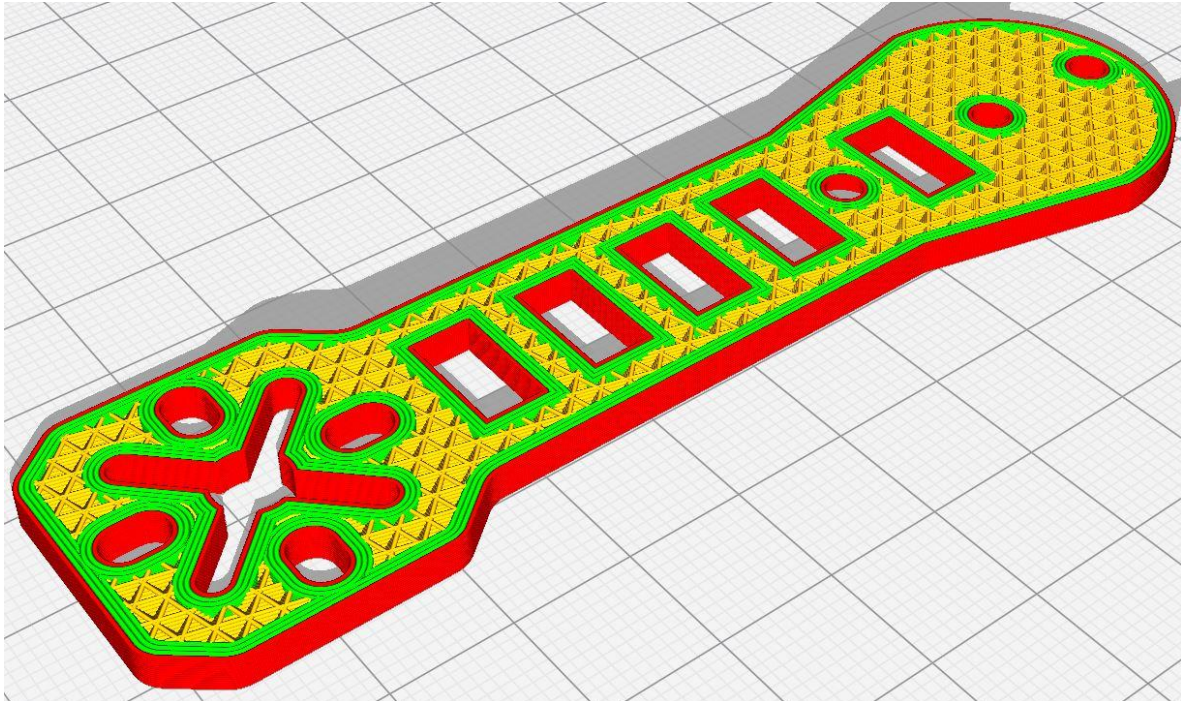
Obrázek 6: Webová stránka projektu Peon230 – Quadcopter (Tech2C, 2015)

Ze stránky projektu jsem stáhl všechny potřebné soubory. Protože jsou všechny díly a návrhy pod licencí Creative Commons ve znění: „*uved'te původ a nepoužívejte komerčně*“, mohu je pro potřebu této práce zdarma používat a upravovat. Část dílů jsem přizpůsobil a pozměnil pro vlastní potřeby:

- Spodní spojovací díl jsem upravil a vytvořil tak díl sloužící jako držák baterie a přistávací nožičky. Díl si zachoval svoji původní funkci spojování ramen se základnou.
- Z ramen jsem vytvořil delší a pevnější zahnutá experimentální ramena pro měření.
- Sám jsem si navrhl ochranné zábrany vrtulí a zvýšil tak bezpečnost a výdrž dronu a jeho vrtulí. V praxi se při kolizi nejčastěji rozbije zábrana a vrtule tak zůstane celá.

Pro design zábran jsem se inspiroval u ostatních návrhů. Design dílů si stále vylepšuji a vytvářím další díly.

Tisk rámu



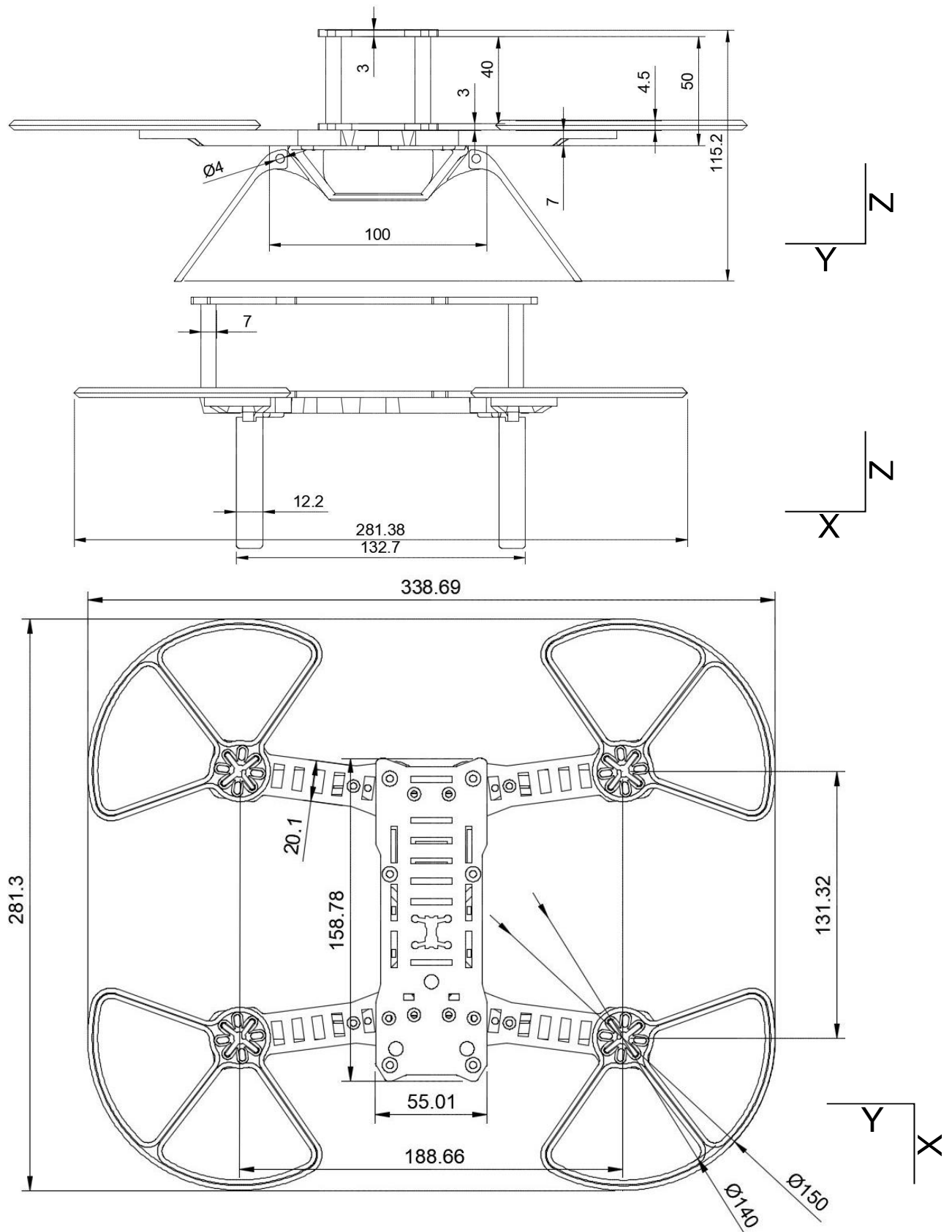
Obrázek 7 Řez v 15. vrstvě (tj. cca 3 mm) náhledem „vyslicovaného“ ramene **1318** pro tisk, program Cura 3.0.4. Červená barva značí vnější perimetr, zelená 3 vnitřní perimetry a žlutá značí 60% výplň typu „cubic“.

Všechny díly jsou ve formátu stl (stereolitografie). Tento typ souboru obsahuje 3D model popsany trojúhelníky, které definují jeho rozměry a podobu. Po stažení nebo návrhu dílů jsem použil program (tzv. slicer, čili plátkovač) Cura od společnosti Ultimaker pro „nakrájení“ či „vyslicování“ [vyslajsování] modelu na jednotlivé vrstvy a vytvoření instrukcí pro 3D tiskárnu. Slicer vytvoří soubor pod koncovkou gcode. Gcode obsahuje řadu souřadnic, které vytyčují cestu trysky prostorem. Gcode jsem přenesl přes SD kartu do tiskárny typu Prusa i3, nahřál trysku a tiskovou podložku na provozní teploty odpovídající materiálu, který jsem tiskl, a začal tisk. Tisk probíhal podle velikosti dílu od 40 do 123 minut (viz tabulka 2 v příloze).

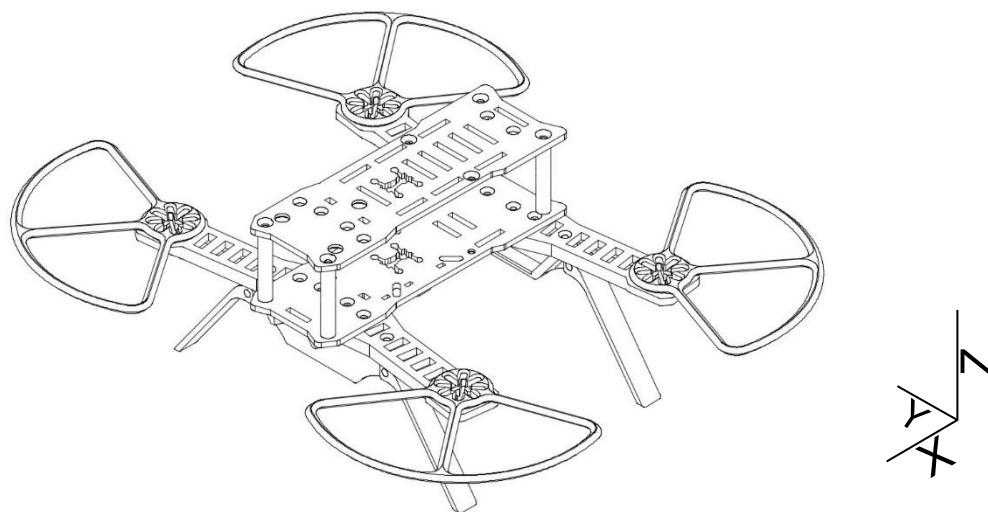
Po tisku následovalo u většiny dílů dočistění obnášející obnovení průměrů otvorů a odstranění přebytečného materiálu naneseného jeho únikem z trysky během netiskových přejezdů trysky přes tištěný díl.

Sestavení rámu

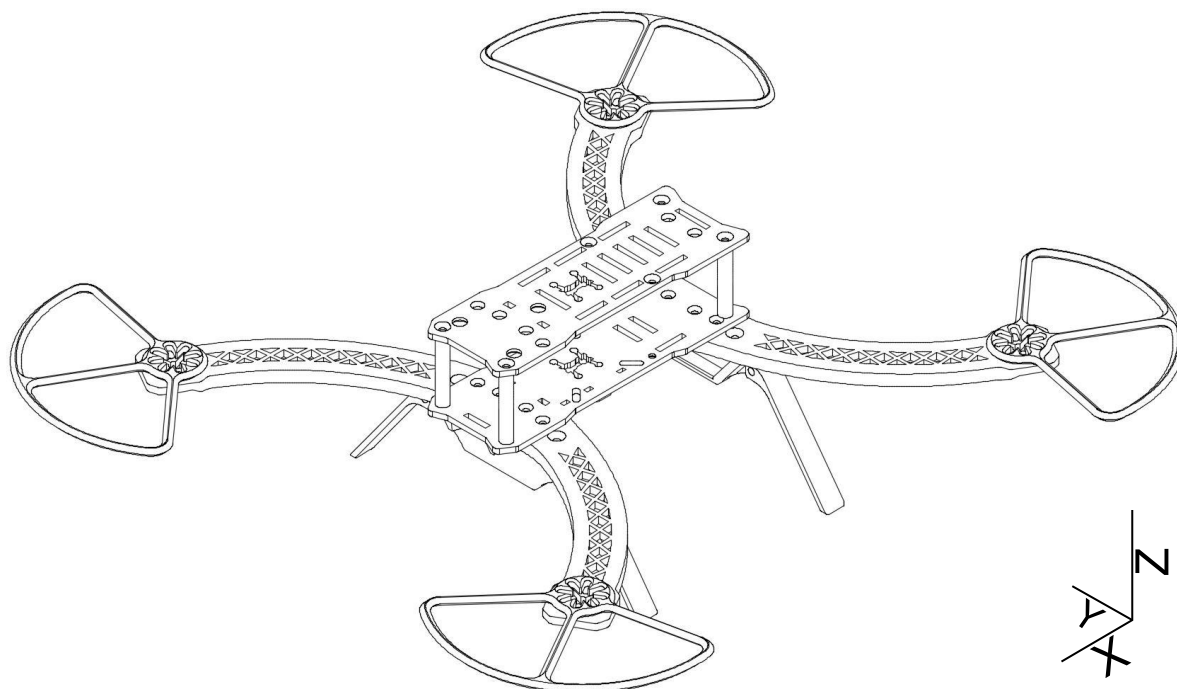
Vytisknuté modely jsem spojil pomocí matic a šroubů rozměrů M2,5 a M3 v rám s rozměry vyznačenými na následujících výkresech.



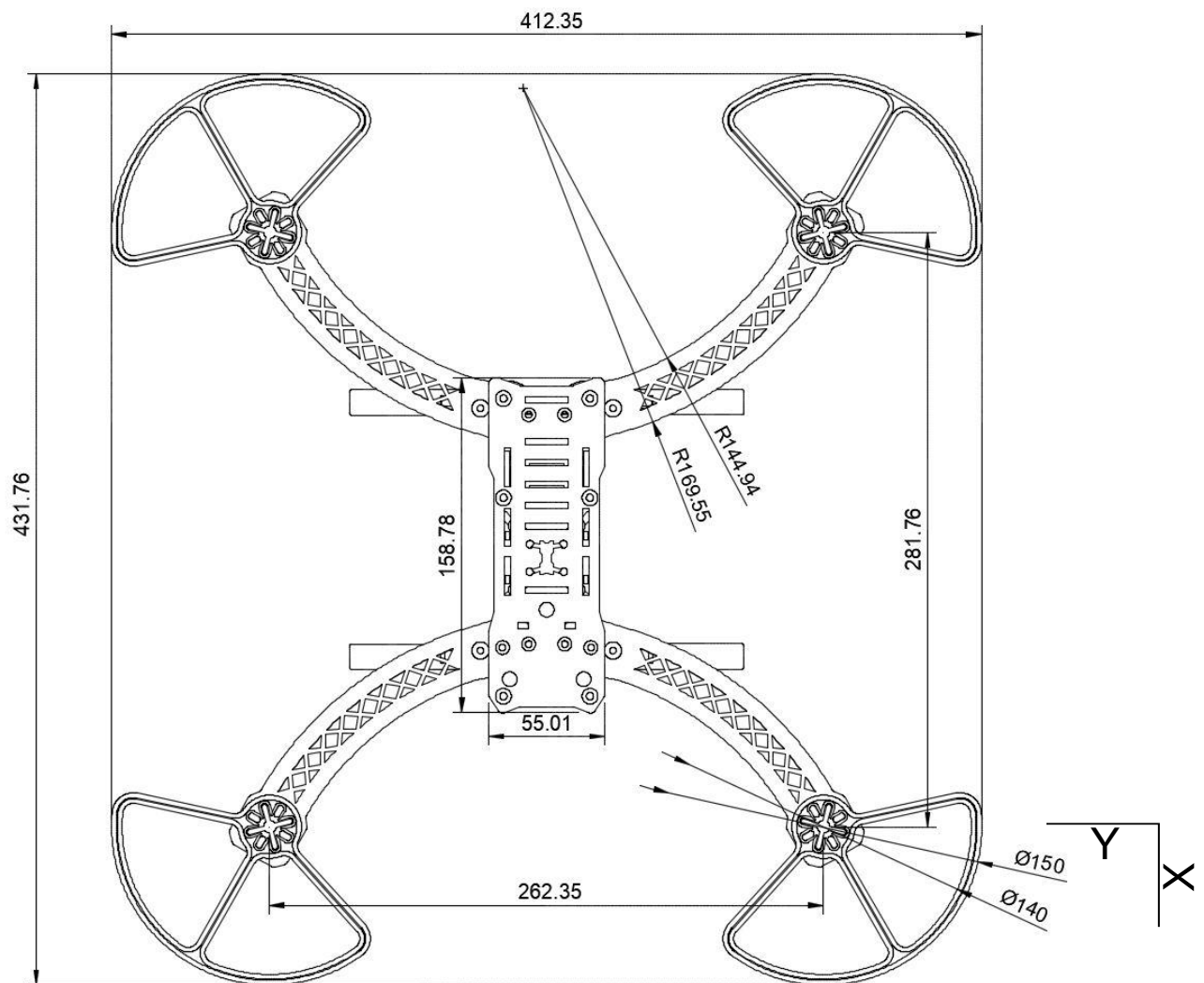
Obrázek 8 Nákres konstrukce 1318 s původním rozpětím (rozměry v mm). Program Autodesk Fusion 360



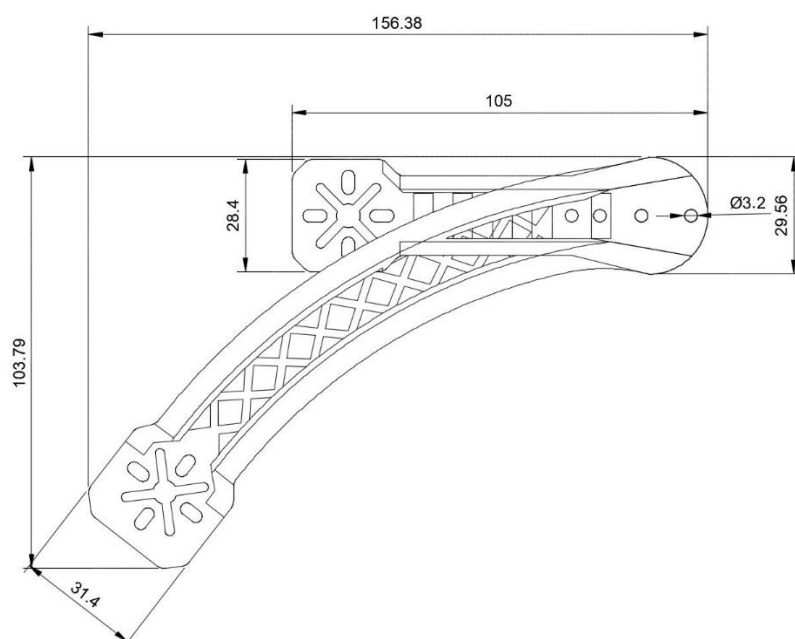
Obrázek 9 Nákres kompletní **1318**, pro porovnání stejné měřítko jako níže **2826**. Program Autodesk Fusion 360



Obrázek 10 Nákres kompletní **2826**, pro porovnání stejné měřítko jako výše **1318**. Program Autodesk Fusion 360



Obrázek 11 Náčres konstrukce **2826** (rozměry v mm). Program Autodesk Fusion 360



Obrázek 12 Kombinovaný náčres ramen **1318** (malé) a **2826** pro porovnání velikosti (rozměry v mm). Program Autodesk Fusion 360

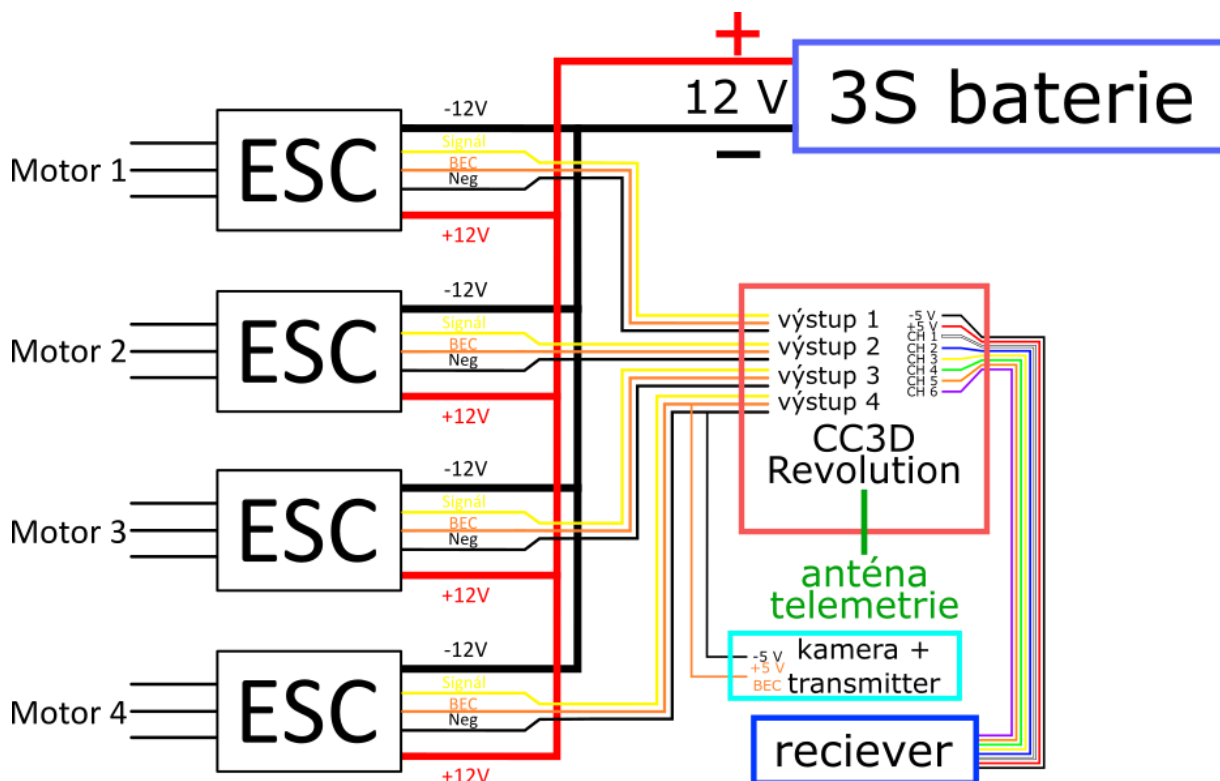
Konfigurace firmwaru

Vzhledem k faktu, že jsem použil výpočetní jednotku CC3D Revolution, neproběhla konfigurace a zprovoznění desky v továrně, ale desku jsem si konfiguroval sám. Konfiguraci jsem provedl v programu LibrePilot Ground Control Station (angl. pozemní ovládací stanice). Konfigurace byla rychlá, protože v programu je vestavěný jednoduchý konfigurátor. Konfigurátor si postupně vyžádá informace o dronu a podle nich vytvoří konfiguraci, kterou spolu s firmwarem nahraje na výpočetní jednotku. Informace, které konfigurátor potřebuje jsou:

- typ stroje (kvadkoptéra/helikoptéra/trikoptéra/auto, ...)
- pořadí motorů
- rozvržení rotací motorů
- směr natočení výpočetní jednotky
- typ transmitteru
- nastavení transmitteru
- neutrální rychlost motoru, tj. nejmenší napětí, při kterém se motor stabilně točí

Osazení elektronikou

Po sestavení rámu přišla na řadu elektronika, tu jsem z velké části koupil na čínských e-shopech banggood.com a gearbest.com, nebo na e-shopu ebay.com. Celý soupis komponent, jejich cen a odkazů na ně je v tabulce 1 v příloze.



Obrázek 13 Schéma kompletního zapojení elektroniky

Hardwarová konfigurace

Kromě konfigurace elektronických komponent je důležité i uspořádání hardwaru na rámu dronu. Výpočetní jednotku jsem pro co nejlepší výsledky umístil do středu dronu na dolní základnu. Na horní základnu jsem přišrouboval receiver. Na spodní straně horní základny jsem použil již existující otvory a přišrouboval do nich desku distribuující napětí – PDB. Orientace PDB je následující: kondenzátory směřují od základny a pole označené „Vin a GND“ jsou na zadní části dronu.

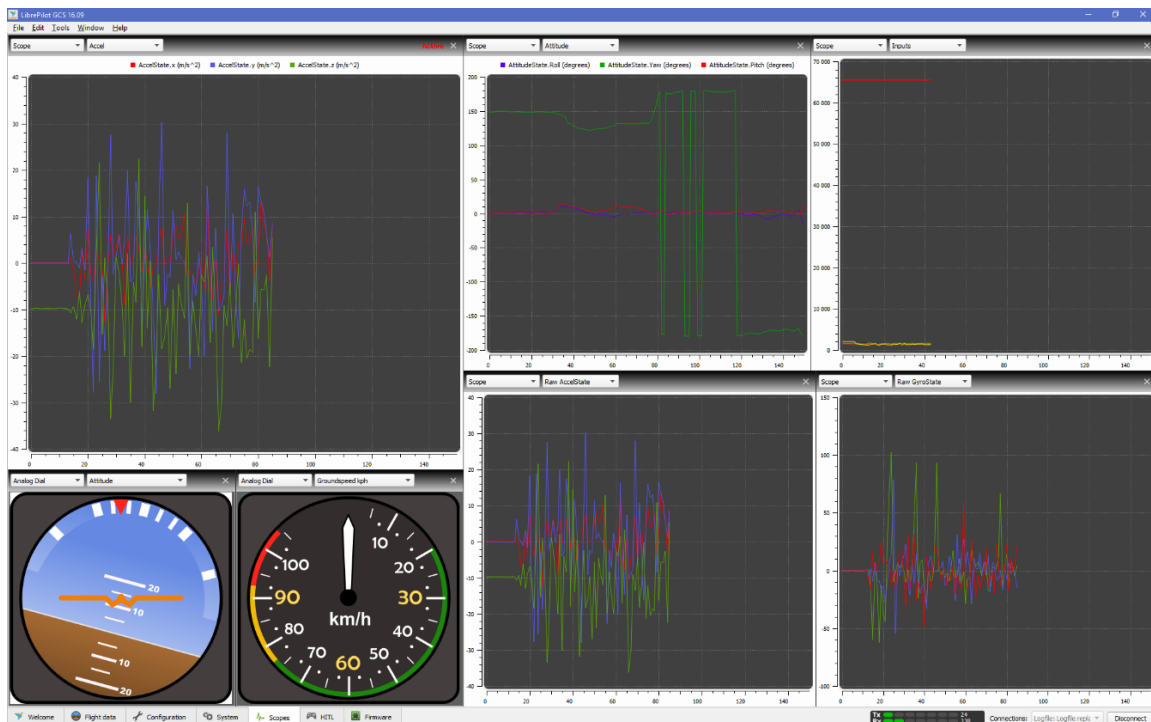
Zapojení ESC jsem provedl pomocí JST konektorů, viz tabulka 2 v příloze, kdy kontakty konektoru jsou připájeny přímo na PDB (pole Vout+ a GND). Konektory JST jsem zvolil pro zjednodušení manipulace s ESC a motory. Motory jsem připájel přímo na desku ESC, protože s nimi nebudu nikdy hýbat odděleně. Důležité je také rozmístění samotných motorů, viz kapitola *Motory*, a k nim příslušných vrtulí. Při nesprávném zapojení motorů a přiřazení rotací se dron může místo vznášení přitlačovat k zemi, nebo může být neovladatelný.

Měření

Dron jsem vytvořil modulárně, je tedy jednoduché střídat dvě velikosti ramen. První verze **1318** je původní od autora Tech2C (viz obrázky 6, 8 a 9). V experimentální verzi **2826**, pro kterou jsem vytvořil experimentální ramena, má dron rozměry výrazně větší (viz obrázky 10, 11 a 12). Pro potřeby přestaveb jsem veškerou elektroniku spojenou s motory připojil přes odnímatelné JST konektory.

Zálety a sběr dat

Experimentu samotnému předcházelo množství záletů s cílem vytvořit nejlepší konfiguraci dronu. Během záletů jsem také zdokonaloval své pilotní dovednosti. Měřicí lety jsem provedl během dvou dnů na začátku února za stejného počasí, 3 °C, lehký vítr, zatažená obloha, po dešti, na rovném prostranství lesoparku Satalice N 50°7.61265', E 14°35.14537'. Během letů jsem na počítači s běžícím programem LibrePilot GCS (obrázek 14) a připojeným modulem pro telemetrii sbíral data o náklonu ve všech třech osách do souboru csv. Na smartphonu jsem přijímal a ukládal video z paluby dronu pro lepší zpětnou orientaci v záznamu průběhu letů. Měřil jsem ve dvou letech s verzí **1318** a dvou s verzí **2826**. V každém letu jsem provedl 2 až 4 měřicí manévry pro každou osu.



Obrázek 14 Program LibrePilot GCS během měřicího letu. V levém dolním rohu umělý horizont s budíkem rychlosti. Grafy ukazují živý časový průběh hodnot náklonů a akcelerací v jednotlivých osách a vstupů z receiveru.

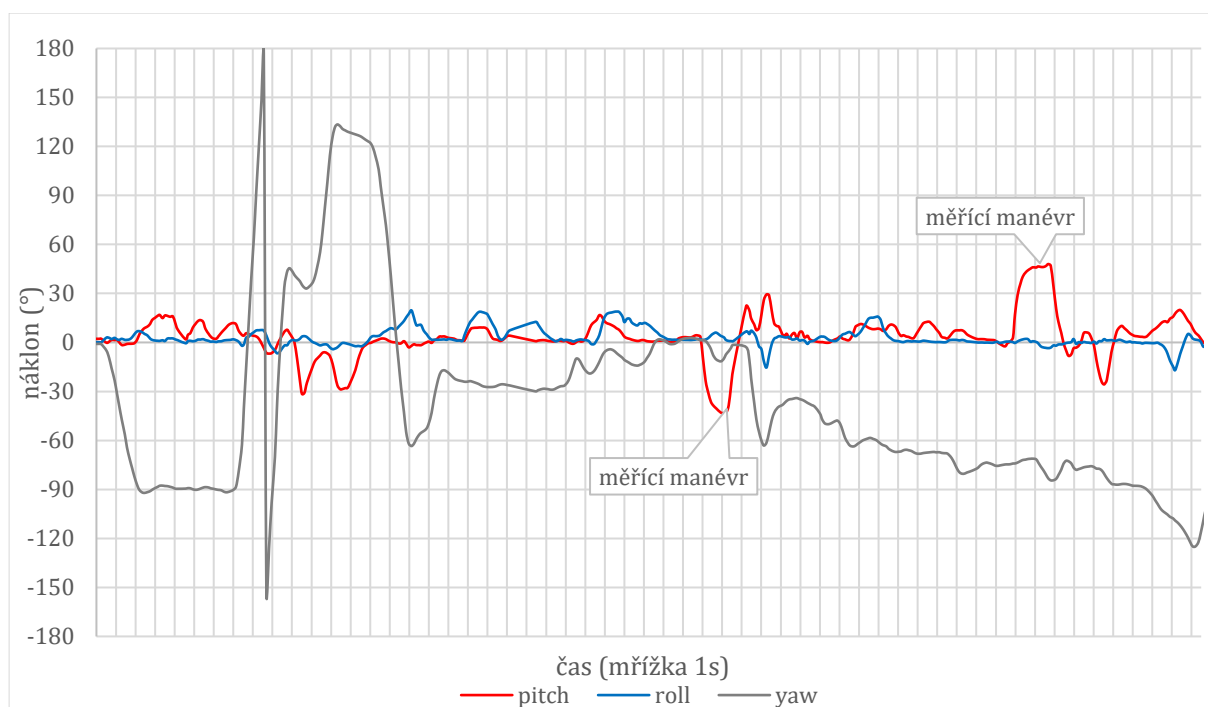
Průběh měřicího letu

Měřicí let jsem navrhl pro jednoduché zpracování výsledků. Začal jsem rychlým nabráním výšky bez pohybu po ostatních osách. Následovala série manévřů, které dostaly drona do maximálních naklonění v jednotlivých osách. Provedl jsem maximální zrychlení po ose X a zpět, tzn. s dronem jsem letěl popředu od mé pozice a poté pozadu zpět na mou pozici (maximální pitch). Následovalo maximální otočení kolem osy Z (yaw). Dron jsem vrátil do výchozí pozice a provedl stejný manévr jako s osou X, ale pro osu Y (roll).

V praxi ovšem měřicí lety nevypadaly tak jednoduše. Dron, a to hlavně **1318**, je velmi mrštný a ovlivnitelný větrem, proto měřicí manévry byly vždy jen částí delšího letu, který byl plný korekčních a přibližovacích manévřů.

Vyhodnocení dat

Z letu jsem získal csv soubor obsahující data o úhlu náklonu pro tři osy, které se zaznamenávaly v intervalech mezi 100 a 140 ms. Ze zaznamenaných os jsem pro srovnání použil pouze osy X a Y (roll a pitch), protože osu Z (yaw) je složité izolovat a prokazatelně srovnat. V programu Microsoft Excel jsem csv převedl do tabulky a z ní vytvořil graf ukazující průběh letu viz graf 1.



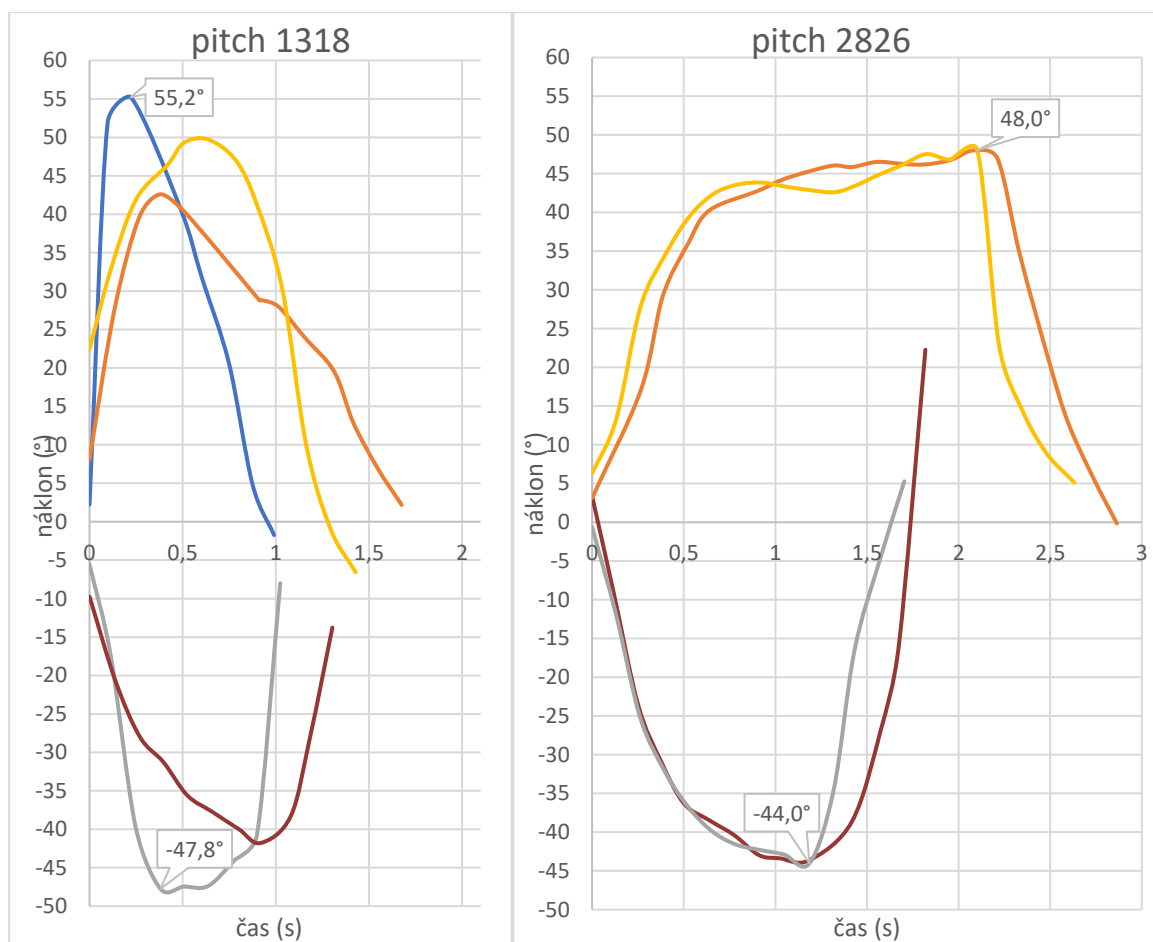
Graf 1 Ukázka části měřicího letu **2826** s vyznačenými měřicími úseky

Pomocí videozáznamu a grafu jsem identifikoval polohy měřících manévru a jejich průběh jsem oddělil do další tabulky. Všechny křivky zachycující stejný typ manévru jsem vložil do stejného grafu a vytvořil tak 4 souhrnné grafy viz kapitola *Výsledky*.

Výsledky a diskuse

Během měřících letů jsem provedl větší množství manévřů, a ne všechny šly zahrnout do výsledků. Hlavně u verze **1318** se průběhy často lišily, buď díky vlivu větru, nebo jen díky obecné nestabilitě. Výběr v následujících grafech je tedy jen použitelná část provedených měření. Za dobu, kdy létám, se mi ze subjektivního hlediska létalo lépe s verzí **1318** za dobrého bezvětrného počasí, zatímco verze **2826** mi více vyhovovala za větru. Obecně mohu říci, že data korespondují s mými pocity pilota. Verze **2826** se chovala pomaleji a její ovládání bylo jednodušší, zatímco **1318** byla těžší na ovládání a každý manévr prováděla agresivněji.

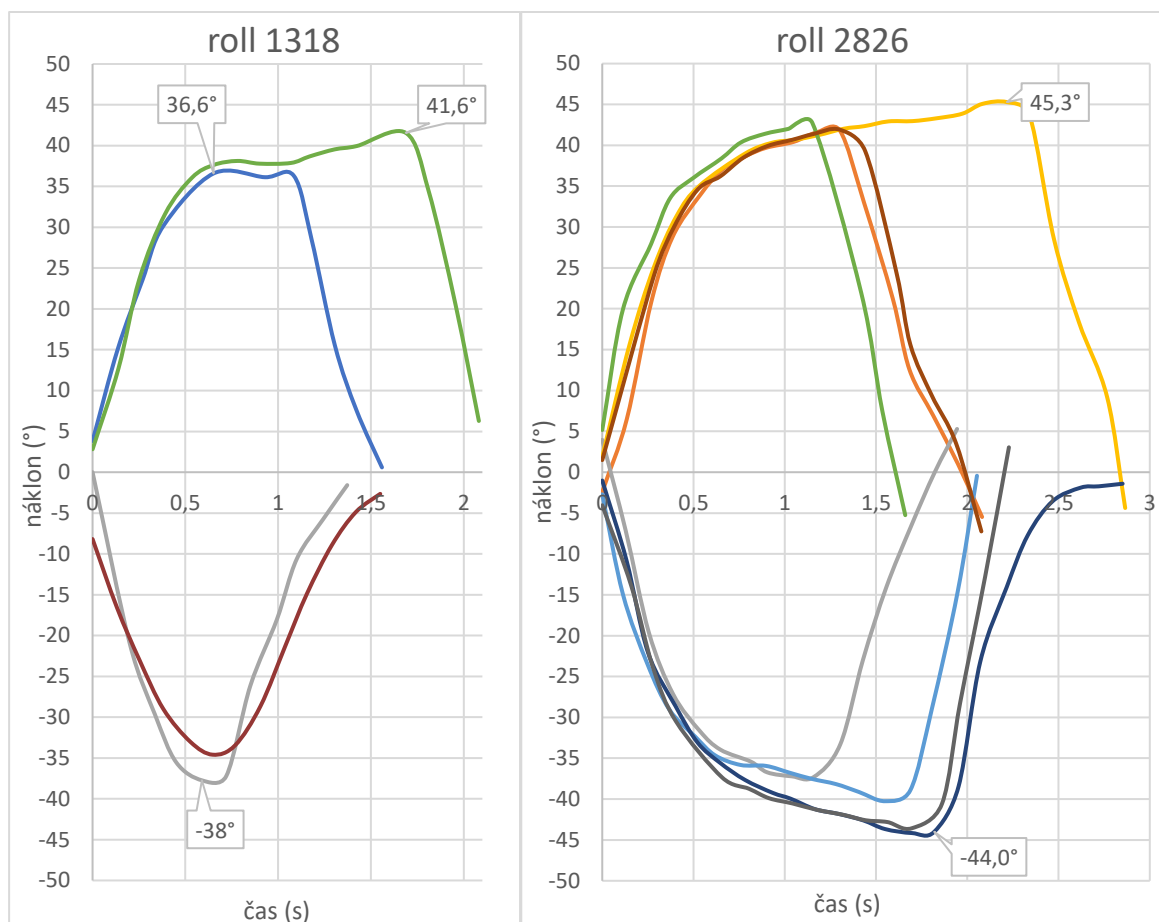
Chování náklonu pitch



Graf 2 Porovnání průběhu náklonů pitch během měřících manévřů verze **1318** vlevo a **2826** vpravo (stejná měřítka)

Z hlediska náklonu pitch, který je při letu nejdůležitější, se ukázala jako rychlejší verze **1318**, která dosáhla větších maximálních hodnot, a to za výrazně kratší čas. Oproti tomu verze **2826** byla v nabírání náklonu pomalejší, a její maximální hodnoty byly nižší. Verze **2826** si získaný náklon držela déle než **1318**. Je zde vidět nestabilita modelu **1318**, její maximální hodnoty se odlišují více než u verze **2826**. Takto velká odchylka může být vysvětlena větším rozdílem v předozadním rozpětí motorů: 13 a 28 cm.

Chování náklonu roll



Graf 3 Porovnání průběhu náklonů roll během měřících manévřů verze 1318 vlevo a 2826 vpravo (stejná měřítka)

U náklonu roll je vidět lehce opačný trend. Verze **2826** dosáhla větších maximálních hodnot. Rychlost změn náklonů se mezi verzemi neliší, obě se po 0,5 sekundě pohybovaly kolem $\pm 35^\circ$. V čase potřebném k dosažení maximálního náklonu nelze určit jednoznačný rozdíl, to může být vysvětleno nižší odchylkou ve stranovém rozpětí: 26 a 18 cm, než jaká je u náklonu pitch. Je zde ale patrný opakující se jev, kdy **1318** se oproti **2826** rychleji vrací do nulového náklonu.

Fyzikální vysvětlení

V principu letu n-koptér hraje hlavní roli vzdálenost motorů od těžiště. Díky principu páky, se může zdát, že motory vzdálenější od těžiště budou vytvářet větší moment, a tudíž bude koptéra rychleji rotovat kolem jednotlivých os, nesmíme ale zapomenout na výrazně větší vzdálenost spojenou s větším rozpětím motorů, kterou musí vrtule překonat, aby se posunuly o stejný úhel. Ve výsledku tedy při použití stejné konfigurace motorů a vrtulí menší vzdálenost motorů od osy otáčení přispívá k vyšší rychlosti rotace okolo dané osy otáčení. Toho lze využít při návrhu dronu tak, že pro náklon kolem osy Y (pitch) motory umístíme blíže k sobě, což nám dodá pro důležitý pohyb vpřed a vzad dostatečnou rychlost a agresivitu a pro náklon kolem osy X (roll), který není v letu tak důležitý, zvolíme větší rozpětí motorů a tím zvýšíme stabilitu pro případné výkyvy ze stran, které mohou být způsobené například větrem. Tímto způsobem je autorem Tech2C navržena verze **1318**, která má předozadní rozpětí 13 cm a stranové 18 cm.

Závěr

Z měření vyšla původní menší verze drona s rozpětím 13 cm x 18 cm jako hbitější, mrštnější a méně stabilní, což koresponduje s mým vjemem pilota. Verze **1318** rychleji reagovala a měla méně „vlastní vůle“. Oproti tomu se dron ve verzi s rozpětím 28 cm x 26 cm choval stabilněji, pomaleji měnil směr a trvalo mu déle, než zareagoval. U verze **2826** jsem ale vyzoroval velký klad, který **1318** postrádá, a to odolnost vůči větru. Menší **1318** se nechala unést i malým poryvem, zatímco **2826** jim odolávala. Stabilnější let většího drona **2826** je patrný i z měření.

Na základě pozorování jsem vyvodil závěr, že pro co nejrychlejší manévry je výhodné, když kvadkoptéra má malé rozpětí motorů. Pokud potřebujeme stabilní kvadkoptéru pro například natáčení videa, je výhodné mít drona s větším rozpětím motorů.

V průběhu záletů se ukázala zásadní výhoda modulárního tištěného rámu. Po téměř každém letu byla nějaká část drona rozbitá, nejčastěji zábrany vrtulí a nohy. Díky tomu jsem postupně vyvíjel lepší komponenty, které vydržely větší nárazy.

Získané informace, znalosti a dovednosti plánuji v budoucnu využít ať pro stavbu dalšího drona, nebo pro různé projekty v oblasti RC. Nemalou zkušeností pro mne také bylo takto dlouhodobé využití mé 3D tiskárny. Byl to můj první velký projekt, ve kterém 3D tiskárna hrála tak klíčovou úlohu. Doufám, že tato práce a informace v ní obsažené budou přínosné i dalším zájemcům o tyto poslední dobou tolik se rozvíjející obory, kterými jsou 3D tisk a drony.

Seznam literatury

- Bistrický, Peter. 2013.** *Návrh a konstrukce quadkoptéry*. Provozně ekonomická fakulta. Brno : Mendelova Univerzita, 2013. str. 84, Diplomová práce.
- Ionescu, Horia. 2010.** The six degrees of freedom: forward/back, up/down, left/right, pitch, yaw, roll. [Online] 6. červen 2010. [Citace: 21. leden 2017.] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2a/6DOF.svg>.
- Jewell, Paul. 2015.** Revolution Configuration. *Libre Pilot Documentation*. [Online] 19. Srpen 2015. [Citace: 10. Únor 2018.] <https://librepilot.atlassian.net/wiki/spaces/LPDOC/pages/2818094/Revolution+Configuration>.
- Karas, Jakub a Tichý, Tomáš. 2016.** *Drony*. Brno : Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4680-4.
- Lněnička, Jaroslav. 1996.** *Letecké modelářství a letectví*. Hradec Králové : Aeromodel, 1996.
- Pilný, Roman. 2012.** Trocha teorie: Transmitters/Vysílače. *RC-Eagle Eye*. [Online] 22. Leden 2012. [Citace: 27. Červenec 2016.] <http://www.rc-eagleeye.cz/rc-eagleeye/5-Theory-Trocha-teorie/15-Transmitters-Vysilace>.
- Pine, Peter. 2008.** Meaning of KV for electric motors. *Electric Flight in Australia*. [Online] 18. Červenec 2008. [Citace: 26. Červenec 2016.] <http://www.flyelectric.com/ans.kv.html>.
- Tech2C. 2015.** Peon230 - Quadcopter. *thingiverse.com*. [Online] MakerBot Industries, LLC, 10. leden 2015. [Citace: 9. srpen 2017.] <https://www.thingiverse.com/thing:629338>.
- Tomeček, Richard. 2011.** Přechod na Li-Po. *Moje Modely*. [Online] 28. Srpen 2011. [Citace: 27. Červenec 2016.] http://www.mojemodely.cz/clanky/prechod_na_lipo.htm.
- Uhlíř, Adam. 2013.** *Konstrukce a řízení kvadkoptéry*. Fakulta elektrotechniky a informatiky. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2013. str. 50, Bakalářská práce.

Obrázky bez uvedeného autora jsou mé vlastní

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázek 1 Schéma vodičů vycházejících z ESC a zapojených do ESC (není-li uvedeno jinak, obrázek autor).....	8
Obrázek 2 Názvy rotačních pohybů kolem jednotlivých os (Ionescu, 2010)	11
Obrázek 3 Znázornění změn otáček motorů při rotaci kolem osy Z (černá šipka ukazuje výsledný směr pohybu)	12
Obrázek 4 Znázornění změn otáček motorů při rotacích kolem os X (dole) a Y (žluté a zelené šipky ukazují výsledný směr pohybu)	12
Obrázek 5 Znázornění změn otáček motorů při změně výšky nad zemí (černá šipka ukazuje výsledný směr pohybu po ose Z).....	13
Obrázek 6: Webová stránka projektu Peon230 – Quadcopter (Tech2C, 2015)	14
Obrázek 7 Řez v 15. vrstvě (tj. cca 3 mm) náhledem „vyslicovaného“ ramene 1318 pro tisk, program Cura 3.0.4. Červená barva značí vnější perimetr, zelená 3 vnitřní perimetry a žlutá značí 60% výplň typu „cubic“	15
Obrázek 8 Nákres konstrukce 1318 s původním rozpětím (rozměry v mm). Program Autodesk Fusion 360	16
Obrázek 9 Nákres kompletní 1318 , pro porovnání stejné měřítko jako níže 2826 . Program Autodesk Fusion 360.....	17
Obrázek 10 Nákres kompletní 2826 , pro porovnání stejné měřítko jako výše 1318 . Program Autodesk Fusion 360.....	17
Obrázek 11 Nákres konstrukce 2826 (rozměry v mm). Program Autodesk Fusion 360	18
Obrázek 12 Kombinovaný nákres ramen 1318 (malé) a 2826 pro porovnání velikosti (rozměry v mm). Program Autodesk Fusion 360	18
Obrázek 13 Schéma kompletního zapojení elektroniky.....	19
Obrázek 14 Program LibrePilot GCS během měřicího letu. V levém dolním rohu umělý horizont s budíkem rychlosti. Grafy ukazují živý časový průběh hodnot náklonů a akcelerací v jednotlivých osách a vstupů z receiveru.....	21
Obrázek 15 Verze 1318 po měřicím letu	29
Obrázek 16 Verze 1318 po měřicím letu	30
Obrázek 17 Verze 1318 po měřicím letu	30
Obrázek 18 Pohled na měřicí stanoviště, zleva: batoh s rukavicemi, nápojem a náhradními velcro stahovacími páskami (černé klubo), sekundární baterie (šedo-červeno-žlutá), přijímač FPV signálu (černá krabička s anténou a drátem), měřič napětí na bateriích (šedá krabička), počítač s měřicím programem LibrePilot, modul OPLink mini (černý s anténou na klávesnici), ovladač drona a dron 1318 . Za lavičkou ekologický dopravní prostředek bicykl.	31
Graf 1 Ukázka části měřicího letu 2826 s vyznačenými měřicími úseky	22
Graf 2 Porovnání průběhu náklonů pitch během měřicích manévrů verze 1318 vlevo a 2826 vpravo (stejná měřítko).....	23
Graf 3 Porovnání průběhu náklonů roll během měřicích manévrů verze 1318 vlevo a 2826 vpravo (stejná měřítko).....	24
Tabulka 1 Seznam komponent s jejich cenou. První součet představuje základní komponenty, bez kterých dron nemůže létat, druhý součet reprezentuje cenu na jednoho drona i s volitelnými komponentami – označeny zeleně.....	28
Tabulka 2 Časy tisků jednotlivých dílů rámu.....	29

Přílohy

Tabulka 1 Seznam komponent s jejich cenou. První součet představuje základní komponenty, bez kterých dron nemůže létat, druhý součet reprezentuje cenu na jednoho drona i s volitelnými komponentami – označeny zeleně

komponenty	odkaz na eshop	cena v USD	popis	počet
RCX 1804 2400KV CW Brushless Motor	http://www.gearbest.com/rc-quadcopters-parts/pp_132488.html	\$ 9,66	motor CW	2
RCX 1804 2400KV CCW Brushless Motor	http://www.gearbest.com/rc-quadcopters-parts/pp_132489.html	\$ 7,89	motor CCW	2
OpenPilot CC3D Revolution Revo 10DOF STM32F4 Flight Controller Straight Pin for RC Drone FPV Racing Multi Rotor	https://www.banggood.com/OpenPilot-CC3D-Revolution-Revo-10DOF-STM32F4-Flight-Controller-Straight-Pin-p-1000068.html?rmmds=myorder&cur_warehouse=CN	\$ 43,99	CC3D Revolution výpočetní jednotka	1
EMAX Simonk 12A ESC FPV QAV250	http://www.gearbest.com/rc-quadcopter-parts/pp_323706.html	\$ 27,81	ESC (balení 4 kusů)	1
GEPRC 5040 3-blade Propeller for RC Racing Drone - 2 Pair - PERIWINKLE	https://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_606115.html	\$ 1,41	třílísté vrtule (set 2+2 kusů)	1
Eachine TX02 NTSC Super Mini AIO 5.8G 40CH 200mW VTX 600TVL 1/4 Cmos FPV Camera	https://www.banggood.com/Eachine-TX02-Super-Mini-AIO-5-8G-40CH-200mW-VTX-600TVL-14-Cmos-FPV-Camera-p-1088368.html?rmmds=search&cur_warehouse=CN	\$ 17,99	kamera + FPV transmitter	1
Eachine ROTG01 UVC OTG 5.8G 150CH Full Channel FPV Receiver	https://www.banggood.com/Eachine-ROTG01-UVC-OTG-5-8G-150CH-Full-Channel-FPV-Receiver-For-Android-Mobile-Phone-Smartphone-p-1147692.html?rmmds=myorder	\$ 19,55	FPV reciever a převodník na micro USB pro smartphone	1
FlySky FS - CT6B 2.4GHz 6CH Transmitter with Receiver FS - R6B	http://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_230935.html	\$ 30,00	rádio set transmitter + reciever	0,5
FLOUREON 11.1V 3000mAh 3S 30C (Deans Plug) Li-Polymer Battery	http://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_211589.html	\$ 29,12	2 kusy 3S baterie 3000 mAh, 30C	0,5
FA410034 Universal 12 - Way 100A Multi - rotor Power Distribution Hub Board	http://www.gearbest.com/development-boards/pp_69341.html	\$ 4,07	deska distribuující proud pro jednodušší napájení	1
7.4V 11.1V 2S 3S LiPo Battery Balance Charger	http://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_244982.html	\$ 7,44	nabíječka 3S a 2S li-po baterií	1
Special Design 10 Pairs 100mm Male and Female JST Connector Plug Line for RC BEC Lipo Battery	http://www.gearbest.com/rc-parts/pp_61472.html	\$ 1,60	10 párů konektorů pro jednodušší napájení	1
Lipo LiFe LiMn Li-ion Battery Monitor Alarm Low Voltage Buzzer Alarm Indicator 1S-8S	http://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_207054.html	\$ 0,99	alarm měřící napětí baterie pro zabránění vybití	1
OPLINK MINI CC3D REVO Universal Transceiver TX RX Module Remote PPM input	https://www.ebay.com	\$ 11,17	modul OPLink mini	1
	1. součet	\$ 137,87		
	2. součet	\$ 215,68		

Tabulka 2 Časy tisků jednotlivých dílů rámu

díl	čas tisku [min]	počet	celkový čas tisku [h:min]
rameno	40	4	2:40
dolní základna	123	1	2:03
horní základna	73	1	1:13
experimentální rameno	81	4	5:24
zábrany vrtulí	25	4	1:40
přední nohy	61	1	1:01
zadní nohy	58	1	0:58
			14:39



Obrázek 15 Verze 1318 po měřicím letu



Obrázek 16 Verze 1318 po měřicím letu



Obrázek 17 Verze 1318 po měřicím letu



Obrázek 18 Pohled na měřicí stanoviště, zleva: batoh s rukavicemi, nápojem a náhradními velcro stahovacími páskami (černé klubo), sekundární baterie (šedo-červeno-žlutá), přijímač FPV signálu (černá krabička s anténou a drátem), měřič napětí na bateriích (šedá krabička), počítač s měřícím programem LibrePilot, modul OPLink mini (černý s anténou na klávesnici), ovladač drona a dron **1318**. Za lavičkou ekologický dopravní prostředek bicykl.