

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA GEOMATIKY

PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE
OBOR INŽENÝRSKÁ GEODÉZIE



Vývoj nosného zařízení pro batymetrické mapování

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Bc. Ondřej Brachtl


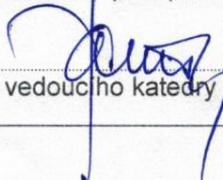
2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Brachtl	Jméno: Ondřej	Osobní číslo: 477013
Zadávací katedra: Katedra geomatiky		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor/specializace: Inženýrská geodézie		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vývoj nosného zařízení pro batymetrické mapování	
Název diplomové práce anglicky: Development of a carrier device for bathymetric mapping	
Pokyny pro vypracování: Vytvoření plovoucí konstrukci pro nesení sonaru Motorizace konstrukce pro možnost dálkového ovládání Provedení batymetrického mapování a vyhodnocení výsledků měření Porovnání výsledků mapování s daty získanými jiným způsobem	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 27.2.2023	Termín odevzdání DP v IS KOS: 22.5.2023 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

27.2.2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací na téma „Vývoj nosného zařízení pro batymetrické mapování“ vypracoval samostatně, pouze s použitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury. Beru na vědomí, že moje práce podléhá právům a povinnostem zákona č. 121/2000 Sb., o autorském právu.

V Praze dne

.....

Ondřej Brachtl

Poděkování

Rád bych chtěl na úvod poděkovat svému vedoucímu mé diplomové práce Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za odbornou konzultaci, ochotu spolupracovat a pozitivní a přátelský přístup při její tvorbě. Dále chci poděkovat svému spolužákovi a dobrému příteli Ing. Lukáši Bělochovi, za každou chvíli, kdy přiložil pomocnou ruku k dílu a každou odbornou zkušenost, kterou se mnou sdílel pro úspěšné vypracování této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí plavidla, které bude sloužit jako nosič sonaru pro batymetrické mapování. Jedná se o konstrukci kombinující 3D tisk a běžně dostupné komponenty tak, aby výsledek byl snadno reprodukovatelný a zároveň cenově dostupný. Díky využití GNSS přijímače na nosiči jsou získaná data georeferencovatelná a snadno vizualizovatelná.

Výsledkem této diplomové práce je dálkově ovládaná plavby schopná konstrukce, která obstojí u několika hodinových měření.

Klíčová slova

plavidlo, batymetrie, sonar, GNSS, trimarán, Pixhawk, krytá vrtule

Abstract

This thesis deals with the design and construction of a vessel that will serve as a carrier for a sonar system for bathymetric mapping. It is a construction that combines 3D printing and commonly accessible components in order to achieve results that are easily reproducible and cost-effective. By using a GNSS receiver on the carrier, the acquired data are georeferencable and easily visualized.

The result of this master's thesis is a remotely controlled structure capable of enduring several hours of measurements.

Key words

vessel, bathymetry, sonar, GNSS, trimaran, Pixhawk, shrouded propeller

Obsah

1. ÚVOD	8
1.1. Cíle práce	8
2. TEORIE	9
2.1. Tvar plavidla	9
2.2. Pohon	9
2.3. Současná batymetrická zařízení	12
3. MODEL PLAVIDLA	13
3.1. Nosná loď	13
3.2. Vedlejší trupy.....	15
3.3. Motory.....	16
4. ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKA	18
4.1. Pohonná elektronika	18
4.1.1. Pixhawk	18
4.1.2. GNSS.....	21
4.1.3. PPM enkodér.....	22
4.1.4. Buzzer	23
4.1.5. 3DR power module	23
4.1.6. Rádio	24
4.1.7. PDB.....	25
4.1.8. Přijímač rádiového signálu	25
4.1.9. Motory	26
4.1.10. ESC	26
4.1.11. Baterie.....	27
4.2. Měřící elektronika	28
4.2.1. Raspberry Pi 4B	28
4.2.2. IMU	29

4.2.3.	GNSS anténa ANT2B-SUR.....	30
4.2.4.	GNSS přijímač.....	30
4.2.5.	Sonar	31
4.2.6.	Powerbanka	32
4.2.7.	Baterie.....	32
5.	KONSTRUKCE.....	34
5.1.	Hlavní trup.....	34
5.2.	Vedlejší trupy.....	39
5.3.	Spojení trupů	44
5.4.	Motory.....	47
5.5.	Zapojení elektroniky	50
5.5.1.	Zapojení pohonu	50
5.5.2.	Zapojení měřící elektroniky.....	57
6.	SOFTWARE.....	61
6.1.	Software pro měření.....	61
6.2.	Software pro ovládání plavidla	62
6.2.1.	Mission Planner.....	62
6.2.2.	QGroundControl	67
6.2.3.	PX4 Autopilot	67
7.	ZÁVĚR	69
8.	ZDROJE	70
9.	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
10.	SEZNAM TABULEK.....	78
11.	SEZNAM PŘÍLOH	79

1. Úvod

Batymetrie je obor, který se zabývá mapováním vodního dna, tedy hloubkou pod vodní hladinou a výsledkem takového měření je batymetrická mapa. V současnosti se pro batymetrická mapování využívají především sonary, ultrazvuková měřicí čidla (např. vyměřovací loď Valentýna II) nebo nověji i letecké skenovací systémy (např. Leica HawkEye-5 Bathymetric LiDAR Sensor). A i proto se pořizovací náklady zařízení pro batymetrické mapování mohou pohybovat i v řádech milionů korun. [1], [2]

Vzhledem k tomu, že batymetrická mapování jsou méně častá než klasické pozemní mapování, může být ekonomicky praktičtější způsobem, jakým si obstarat mapovací zařízení, sestavením zařízení vlastního.

1.1. Cíle práce

Tato práce má za svůj cíl vytvořit plavidlo, resp. nosič pro sonar, který s použitím GNSS přijímače bude zaznamenávat svou polohu za účelem jednoduchého vyhodnocení batymetrického mapování. Cílem je také konstrukci sestavit tak, aby byla při plavbě stabilní, a zároveň rozložitelná a snadno přenositelná. Dále se tato práce bude zabývat návrhem pohonu konstrukce a jeho realizací.

Při celé tvorbě je pak záměrem použít běžně dostupné materiály a komponenty v kombinaci s 3D tiskem a použitím volně dostupných a open-source softwarových programů tak, aby celkové náklady byly minimální možné.

Dalším z cílů bude testování plavidla a jeho schopnosti správně operovat a poskytnout autentické výsledky měření. Součástí práce pak bude i vyhodnocení měřených dat a jejich porovnání s daty získanými jinou metodou pro zhodnocení správnosti měření.

Zároveň tato práce může sloužit jako podklad, pro replikaci a konstrukci takového plavidla za minimální náklady a bez potřeby vyšších odborných znalostí.

2. Teorie

2.1. Tvar plavidla

Chceme-li sestrojít libovolné plavidlo, klíčová bude vždy stabilita takového plavidla. Obecně platí, že čím širší je trup lodi, tím stabilnější loď je. Ale například i úzké plachetnice zůstávají stabilní i při vysokých náklonech. Zde mohou stabilitu zajišťovat kýl nebo vodní křídla „foil“ a plachetnice tak odolá silnému větru a vysokým vlnám.[3]

Jedním ze způsobů, kterým se plavidla udržují stabilní, je tedy požití kýlu. Kýl je část lodi, která vyčnívá zespod trupu a má za účel snižovat odpor vody, zlepšovat hydrodynamiku lodi a také slouží jako protizávaží, které udržuje loď ve vodorovné poloze. Je tu však další aspekt konstrukce plavidla, který je dobré vzít v potaz. Kýl zvyšuje hloubku ponoru a ta se pak promítá do minimální možné výšky hladiny, ve které je možné s plavidlem operovat. Nechceme-li se tedy s konstrukcí plavidla ubírat do hloubky, musíme plavidlo rozšířit.

V Austronésii přišli na způsob, jakým zajistit plavidlu dostatečnou stabilitu šířkou, a to typem lodní konstrukce, kterému dnes říkáme katamarán. Ten se skládá ze dvou samostatných typicky úzkých trupů, které jsou pak k sobě připevněny tyčovou konstrukcí. Trupy katamaránu jsou užší než trupy běžné lodě, a proto mají další velkou výhodu a tou je nižší hydrodynamický odpor, následně je tedy i síla potřebná k jeho pohonu nižší. A je možné, že právě katamarán byl inspirací pro další typ konstrukce, která se nazývá trimarán. Ta je kombinací velkého hlavního lodního trupu společně s dvěma úzkými podpurnými trupy po stranách.

2.2. Pohon

Prvním způsobem lodního pohonu byla samozřejmě lidská síla. Přibližně roku 3000 př. n. l., kdy v Egyptě začínalo umění stavby lodí, bylo pohybu lodě kupředu docíleno vesly a mořem začaly brázdit první veslice. A přesto, že některé z těchto historických lodí měly plachty, lidé je ještě nebyli schopni využívat efektivně. Lidé si tedy byli vědomi příznivého vlivu větru, který proudí-li ve stejném směru se směrem plavby, dokáže do jisté míry pomoci pohonu lodě.



Obrázek 1: Malba v Seneferově hrobce[22]

Na fotografii ze Seneferovi hrobky v Thébách je vyobrazena veslice s plachtou, a ačkoliv se může zdát, že Egypťané tedy aktivně plachty využívaly, jedná se pouze o znázornění směru, kterým se plavba ubírala. V případě rozvinuté plachty se jednalo o plavbu na jih a pokud loď plachtu neměla, směr plavby byl na sever.

Využít efektivně pro plavbu vítr z libovolného směru se však lidé naučili až o několik tisíc let déle a začaly tak vznikat plachetnice, které přinesly velké objevy v oblasti mořeplavby. Protože plachty umožňovaly pohánět velká plavidla, jejichž obsluha je pak méně náročná, staly se běžnou výbavou, nicméně jejich použitelnost přímo závisí na síle větru potřebné k pohonu lodě, což je jejich hlavní nevýhodou.

Převrat v pohonu plavidel přišel s mechanizací lodního pohonu, využitím parních strojů a vynálezem lodního šroubu. Využití lodního šroubu bylo klíčové k ukončení závislosti pohonu na lidské síle a povětrnostních podmínkách. Přesto, že lidská síla byla dále potřebná k plnění parních strojů uhlím, další vývoj technologie s přechodem na spalovací motory eliminoval i tuto potřebu. Lodní šroub však v modernizovaných provedeních používáme dodnes. [4]

Bývají ale situace, kdy vodní plochy bývají, a to hlavně u břehů, zarostlé, znečištěné nebo zakalené a zanele-li se lodní šroub, hrozí pak zaseknutí nebo poškození lodního šroubu objekty pod hladinou. Takovou překážku dokázal svým vynálezem obejít Alexander Graham Bell. Ten v roce 1905 sestrojil plavidlo které, nebylo poháněno lodním šroubem, nýbrž vrtulí umístěnou nad hladinou, která tlačila loď před sebou.



Obrázek 2: Alexander Graham Bell na lodi Ugly Duckling[6]

Tuto loď pojmenoval „Ugly Duckling“ neboli „Ošklivé káčátko“ a byla prvním plavidlem, kterému se déle začalo říkat „Airboat“. Byla jako letadlo poháněna letadlovým motorem, který byl chlazen vodou. Motor však vážil více než jednu tunu a plavidlo tak dosahovalo rychlosti ne vyšší než 7 km/h.

Tento typ konstrukce se začal rychle šířit a jeho variace se začaly objevovat v dalších zemích světa.

Airboat byl „poprvé“ použit a nasazen do bojů první světové války v roce 1915 britskou armádou. Plavidla, která armáda vyvinula měla ploché dno, taktéž letecký motor a vrtuli a dokázala vyvinou rychlost téměř 90 km/h. [7]



Obrázek 3: Airboat britského námořnictva 1915[8]

V této podobě jsou airboaty konstruovány stále. Dnes již ikonický airboat, který známe z Floridských bažin v Miami, se v prostředí plném rostlé trávy dokáže velmi efektivně pohybovat takřka bez omezení. Jeho ploché dno trupu z něho dělá prakticky kluzák, který je schopen se pohybovat po každém povrchu, který je hladký. To demonstrovali i čeští vodní záchranáři, kteří airboatem jsou schopni jet po vodě, ledě i souši. [5]

2.3. Současná batymetrická zařízení

V současné době se na trhu vyskytuje vícero batymetrických zařízení, která umožňují přesné měření a mapování podvodní topografie. Při provádění batymetrického mapování je nezbytné mít k dispozici vhodné plavidlo, ke kterému je možné měřicí přístroj připevnit. Nicméně plavidla se nenabízí jako součást balení a lidé si tak musejí plavidlo obstarat sami. Existuje několik typů plavidel, která se používají včetně lodí, malých člunů či speciálně upravených plavidel, která mohou, ale i nemusí mít lidskou posádku.

Je však třeba podotknout, že existují určité výjimky, kdy firmy nabízejí i plavidlo jako součást svého produktového balíčku čili uživatel si může obstarat kompletní řešení od jednoho dodavatele. Například Sonarmite's Echo Sounder od firmy je možným řešením, protože je to relativně malý dálkově ovládaný člun, který je vybavený moderním sonarovým přístrojem, odrazným hranolem a dá se použít v kombinaci s robotickou stanicí společnosti Leica.[57]

Mnoho lidí si však volí vlastní cestu a rozhodne si vyrobit vlastní plavidlo pro vlastní batymetrické potřeby a existuje řada amatérských návrhů na sestavení vlastního plavidla podle konkrétních požadavků a finančních možností.

Na Fakultě stavební ČVUT se již podobnou problematikou zabývali například Ing. Jaroslav Urik, který řešil otázku softwaru pro sběr dat při mapování dna vodních ploch, nebo Ing. Václav Jurga, který vyvíjel systém pro zaměřování dna vodních ploch. Ten však vycházel z existujícího modelu lodi, který byl příliš vysoký. Kvůli tomu bylo plavidlo ovlivněno silou bočního větru, a to mělo vliv na výsledný směr plavby.

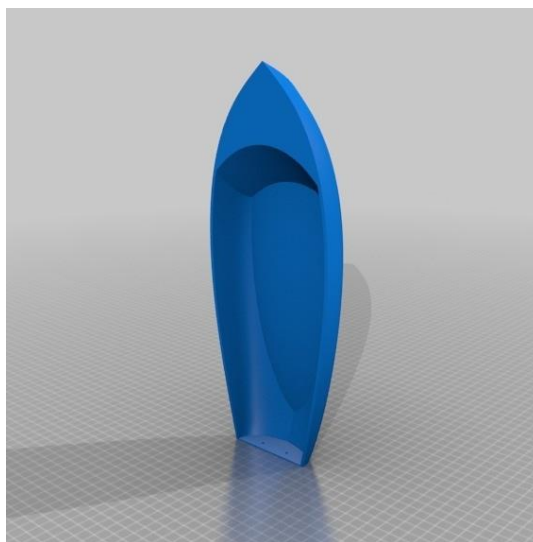
3. Model plavidla

Ideální konstrukcí plavidla se jeví již zmíněný trimarán. Můžeme sestavit hlavní trup nesoucí potřebné vybavení a podpůrné trupy nám zajistí stabilitu, bez výrazného nárůstu hydromechanického odporu. Tím pádem se sníží nároky na pohon, z čehož plyne i nižší spotřeba energie.

Idea konstrukce byla taková, že středový trup bude nést hlavní vybavení (sonar, GNSS přijímač, baterii, řídicí jednotku) a dvojici motorů, vedlejší trupy ponosou každý dvojici motorů a baterii. Plavidlo by tedy bylo poháněno šesticí motorů a bude nést tři baterie, které zajistí provoz alespoň na několik hodin. Je tedy důležité navrhnout model tak, aby bylo možné kabely propojit vybavení v hlavním trupu s vybavením trupů postranních.

3.1. Nosná loď

Jako vzor hlavního trupu byl vybrán volně dostupný 3D model lodičky připravený k 3D tisku. Ten byl následně remodelován v softwaru Autodesk Fusion 360 tak, aby k trupu mohly být připojeny podpůrné trupy a veškeré zařízení. [9], [11]

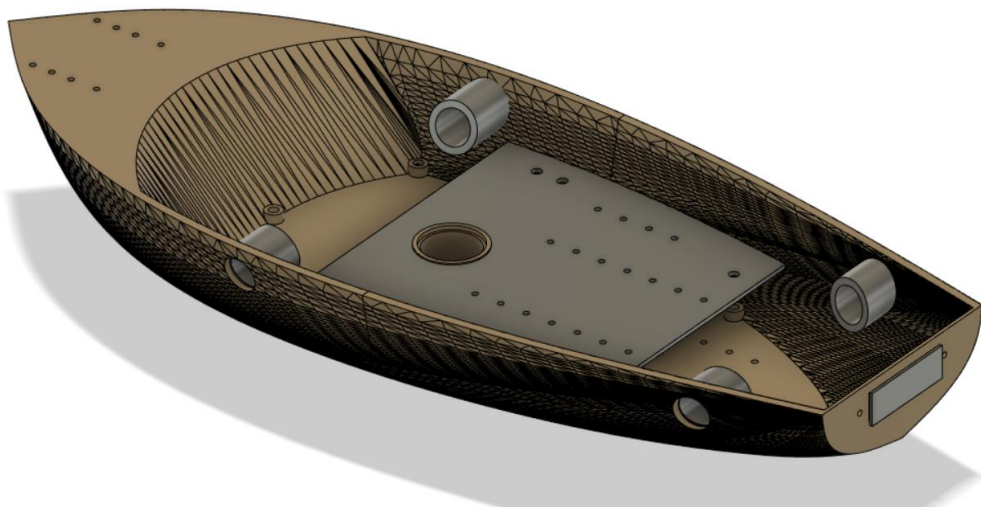


Obrázek 4: Volně dostupný model plavidla[11]

V první řadě byl uprostřed trupu vymodelován otvor skrz o průměru přibližně odpovídajícímu průměru sonaru, který zde bude usazen. Průměr otvoru byl vymodelován nepatrně menší, neboť je důležité, aby sonar s vlastním těsněním byl vyjímatelný

a perfektně dolehl k okrajům otvoru, aby nepropouštěl vodu. V takovém případě je proto jednodušší otvor případně rozšířit dobroušením.

Na přídi a dně modelu byla vytvořena síť jamek, pro zapuštění ocelových závitů, kvůli upevnění zařízení na lodi. Dále na dně byly přidány větší jamky, do kterých budou upevněny závitové tyče, které poslouží k upevnění svrchního krytu lodě. Nad upevněný sonar bylo vymodelováno další patro, opět s otvory na závitů pro další komponenty, neboť při modelování nebylo jisté rozložení jednotlivých elektronických komponentů na lodi.



Obrázek 5: Upravený model plavidla[9]

Na každé straně trupu byly vytvořeny dva otvory pro připevnění pomocných trupů nosnými trubkami. Zvoleny byly trubky z uhlíkového vlákna, protože tento materiál je pevný a velmi lehký a trubkami pak mohou být vedeny kabely propojující jednotlivé komponenty.

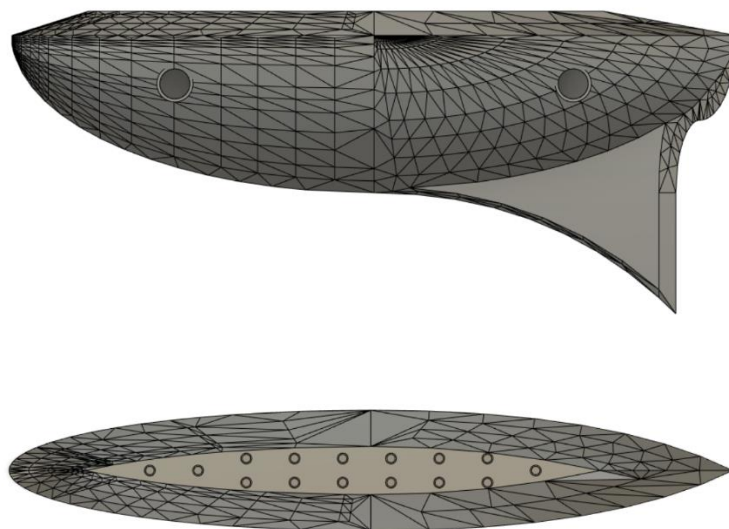
Celý model je příliš veliký a není ho proto možné vytisknout v celku na běžné komerční 3D tiskárně, byl proto rozdělen a vytisknut jako dvě symetricky dlouhé části. Trup byl proto doplněn o sérii otvorů v trupu na straně styku přídě a zádě, kam budou při spojování vloženy ocelové dráty pro zpevnění spoje před lepením.

3.2. Vedlejší trupy

Model vedlejších trupů byl vymodelován v Autodesk Fusion 360 bez předchozích referencí. Model byl konstruován, tak aby byl štíhlý a vytvářel malý hydrodynamický odpor, a zároveň aby pomáhal hlavnímu trupu udržovat směr. Proto tvar půdorysně připomíná protáhlou kapku, protože tento tvar při pohybu vytváří menší hydrodynamický odpor, ve srovnání například s eliptickým půdorysem. Trup byl dále doplněn o směrovou ploutev v zadní části, pro lepší usměrnění toku vody kolem trupu. [9][12]

Dále byly na model vytvořeny otvory stejného průměru a ve stejné vzdálenosti jako na hlavním trupu, pro připevnění nosných trubek. Ve svrchní části modelu byly vymodelovány otvory na zapuštění závitů pro připevnění svrchního krytu vedlejšího trupu.

Svrchní kryt trupu byl vymodelován ve lichoběžníkovém profilu, tak aby na vrcholu byla rovná plocha pro připevnění hnacích motorů a po stranách mohla stékat voda.



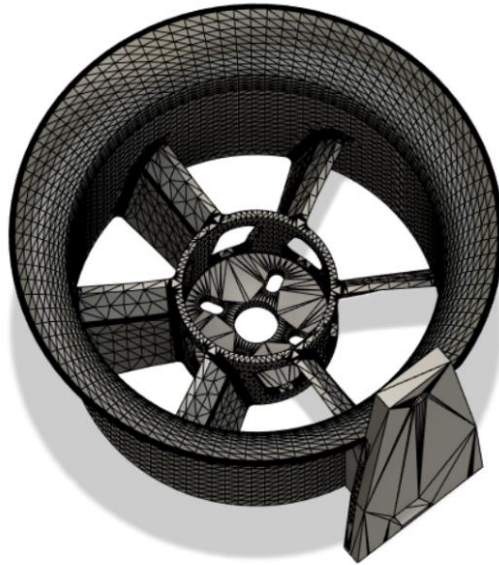
Obrázek 6: Model pravého vedlejšího trupu[9]

3.3. Motory

Pro pohon plavidla jedním motorem, je potřebná vyvinutá síla veliká. Použitím několika motorů, jako například u dronu, se potřebná síla rozloží, nároky na efektivitu jednotlivých motorů se sníží a zároveň se plavidlu dodá lepší možnost manipulace v prostoru. Dostatečným počtem motorů s vrtulí a jejich vhodnou orientací na plavidle by tedy mělo být možné ke změně směru plavby požívat pouze motory, a tak se vyhnout použití kormidla, kterému pod vodou hrozí stejné komplikace jako lodnímu šroubu.

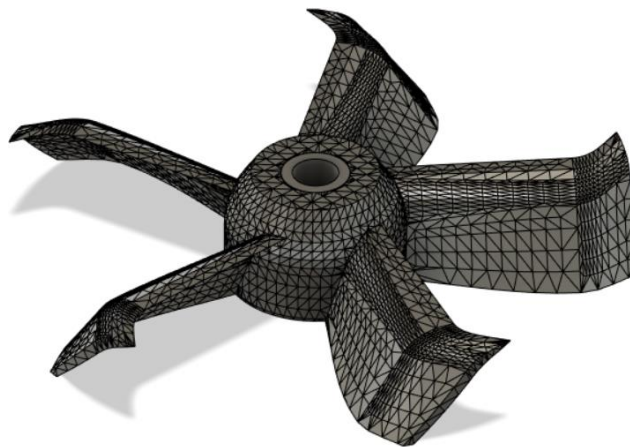
K optimalizaci pohonu vrtulemi byly vrtule umístěny do válcového krytu. Krytá vrtule, anglicky „shrouded propeller“, má totiž několik výhod. Hlavní výhodou je zvýšení tahu vrtule, která je způsobena usměrněním toku vzduchu. Díky tvaru křidélek vrtule je při rotaci před vrtulí vytvářen podtlak a vzduch je hnán za vrtulí. U nekryté vrtule však dochází k tomu, že vzduch je kvůli podtlaku před vrtulí tahán po stranách zpět před vrtulí, kde je následně opět nasát. Krycí rukáv vrtule tedy zabraňuje vzduchu, aby se „cyklil“ po stranách vrtule, což je velmi účinné hlavně při nižších rychlostech. Podle výzkumu vědců z University v Marylandu je možný výsledný tah kryté vrtule až o 15-20% větší než u vrtule nekryté. Kryt dále vrtuli poskytuje ochranu před mechanickým poškozením, díky usměrnění vzduchu snižuje turbulence a tím způsobené vibrace a také snižuje hluk vzniklý rotací vrtule. [13]

Motoroky, které budou použity, jsou bezkartáčové 1000kV RC motory. Pro výchozí vzhled krycího rukávu byl stažen volně dostupný 3D model, který byl následně velikostně dimenzován na velikost motoru v softwaru Autodesk Fusion 360. Dále byla upravena základna sloužící k uchycení krytu s motorem tak, aby ji bylo možné umístit na zúženou část vrchního krytu vedlejších trupů.



Obrázek 7: Upravený model krytu motoru[9]

Součástí staženého modelu byla i pěti čepelová vrtule, jež byla ponechána v původním tvaru a změněna byla pouze její velikost, aby odpovídala změněné velikosti krycího rukávu. [9], [14]



Obrázek 8: Upravený model vrtule[9]

4. Řídící elektronika

Tato kapitola se věnuje elektronickým komponentům, které jsou nezbytné pro správný chod plavidla. Je zde vysvětlena funkce, technické specifikace jednotlivých komponentů a význam, který představují pro funkčnost plavidla.

4.1. Pohonná elektronika

4.1.1. Pixhawk

Pixhawk 2.4.8 by se dal popsat jako mozek celého systému. Je to open-source autonomní zařízení pro řízení bezpilotních prostředků, kterými mohou být bezpilotní letadla, drony nebo autonomní vozidla, které disponuje několika senzory a procesory. V současnosti se jedná o jednu z nejrozšířenějších autopilotních desek na trhu, díky své vysoké spolehlivosti, široké kompatibilitě a mnoha funkcím, které nabízí. Byl vyvinut v rámci open-source projektu PX4 autopilot, který byl zahájen v roce 2009 skupinou Computer Vision and Geometry Group ve Švýcarsku. [15], [16]



Obrázek 9: Pixhawk 2.4.8 [10]

Technické specifikace

Procesory

32bit ARM Cortex-M4 core s FPU

Hlavním procesorem desky je 32bitové ARM Cortex-M4 jádro s FPU (Floating-Point Unit), což je hardwarová jednotka pro práci s pohyblivou řádovou čárkou. Jedná se o mikroprocesor, který je optimalizován pro aplikace v reálném čase a s nízkou spotřebou energie. [17]

Frekvence	180 MHz
Počet jader	1 x 32bit
RAM	256 kB
VDD	1,8 V – 3,6 V
Operační teplota	-40 °C – +85 °C

Tabulka 1: Parametry procesoru 32bit ARM Cortex-M4 core s FPU

VDD – z ang. „Voltage Direct Drain“ označuje napájecí napětí

32-bit STM32F103 failsafe Co-processor

Deska dále disponuje 32-bit STM32F103 failsafe Co-procesorem, což je hardwarová součástka, která je navržena tak, aby sloužila k zajištění stability a bezpečnosti systému v případě neočekávané události nebo chyby. Jeho účel je tedy minimalizovat riziko selhání systému v případě poruchy. [23]

Frekvence	72 MHz
Počet jader	1 x 32bit
RAM	20 KB
VDD	2 V – 3,6 V
Operační teplota	-40 °C – +85 °C

Tabulka 2: Parametry 32-bit STM32F103 failsafe Co-procesoru

Senzory

IMU MPU6000

Prvním ze čtyř senzorů, kterým deska disponuje je MPU6000 vyvinutý společností InvenSense. Jedná se o IMU jednotku, která kombinuje tříosý akcelerometr a tříosý gyroskop, kde akcelerometr měří zrychlení objektu ve všech třech osách (x, y, z) a gyroskop měří úhlovou rychlost rotace objektu kolem těchto os. [18]

Rozlišení	16 bitů
Rozsah měření	$\pm 2 \text{ g} - \pm 16 \text{ g}$
VDD	2,375 V – 3,460 V
Operační teplota	0 °C do +70 °C

Tabulka 3: Parametry akcelerometru[18]

Rozlišení uváděné v bitech udává počet bitů použitých k vyjádření hodnoty. Pomocí 16 bitů je tedy možné vyjádřit až 2^{16} (=65536) různých hodnot. To znamená, že větší počet bitů dokáže vyjádřit menší změny v hodnotách, které mohou být detekovány a zaznamenány s větší přesností.

Rozlišení	16 bitů
Rozsah měření	$\pm 250 \text{ }^\circ/\text{s} - \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$
VDD	2,375 V – 3,460 V
Operační teplota	-40 °C – +85 °C

Tabulka 4: Parametry gyroskopu[18]

Gyroskop ST Micro 16bit gyroscope L3GD20H

Druhým senzorem je tříosý gyroskop ST Micro 16bit gyroscope L3GD20H, vyvinutý společností STMicroelectronics. [19]

Rozlišení	16 bitů
Rozsah měření	$\pm 245 \text{ }^\circ/\text{s} - \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$
VDD	2,2 V – 3,6 V
Operační teplota	-40 °C – +85 °C

Tabulka 5: Parametry gyroskopu

Akcelerometr/kompas ST Micro 14bit LSM303DLHC

Třetím senzorem je ST Micro 14bit accelerometer/compass (magnetometer) LSM303DLHC, také vyrobený společností STMicroelectronics. [20]

Rozlišení	14 bitů
Rozsah měření	$\pm 2 \text{ g} - \pm 16 \text{ g}$
VDD	2,16 V – 3,60 V
Operační teplota	-40 °C do +85 °C

Tabulka 6: Parametry akcelerometru

Rozlišení	14 bitů
Rozsah měření	±1,3 Gauss – ±8,1 Gauss
VDD	2,16 V – 3,60 V
Operační teplota	-40 °C do +85 °C

Tabulka 7: Parametry kompasu

Barometr MEAS MS5611

Čtvrtým a posledním senzorem na desce Pixhawk je barometr MEAS MS5611. [21]

Rozlišení	24 bitů
Rozsah měření	10 mbar – 1200 mbar
VDD	1,8 V – 3,6 V
Operační teplota	-40 °C do +85 °C

Tabulka 8: Parametry barometru

Cena: 2841 Kč (31. 5. 2023 [48])

4.1.2. GNSS

Externí M8N GPS 8M compass modul kompatibilní se zařízením Pixhawk 2.4.8 je samostatný GNSS přijímač, který zároveň obsahuje i kompas. Prodejce uvádí, že zařízení je připraveno k použití a není třeba ho nijak revidovat. [24]

Polohová přesnost	± 2 m
Podporované GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo
Maximální počet satelitů	72
Obnovovací frekvence	18 HZ
VDD	2,7 V – 3,6 V
Operační teplota	-40 °C – +105 °C
Cena	813 Kč

Tabulka 9: Parametry GNSS přijímače

Cena: 469 Kč (31. 5. 2023 [49])



Obrázek 10: GNSS přijímač s kompasem [10]

4.1.3. PPM enkodér

PPM enkodér je hardwarová součástka, která přijímá až 8 signálů z jednotlivých kanálů PWM („pulse width modulated“), tedy digitální signály, které se skládají z periodických pulzů s různou šířkou a převádí je na jeden signál PPM („pulse position modulation“), kde je informace zakódována do polohy jednotlivých pulzů v čase. V této práci slouží k přijímání signálu z dálkového ovladače radiovým přijímačem, na který je napojena a převádí ho do řídicí jednotky Pixhawk přes RC pin vstup. Běžně na vstupu 1. z 8 kanálů koresponduje s podélným náklonem (roll), 2. s příčným náklonem (pitch), 3. s plynem (throttle) a 4. s otáčením (yaw). Další kanály jsou závislé na konkrétním druhu dálkových ovladačů. [25][26][27][28]

Cena: 139 Kč (31. 5. 2023 [50])

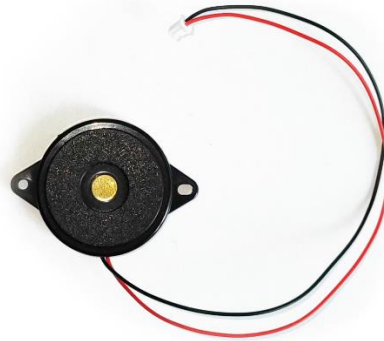


Obrázek 11: PPM Encoder [10]

4.1.4. Buzzer

Součástka buzzer neboli zvukový alarm, není pro chod celého zařízení nezbytná, ale poskytuje aktivní zpětnou zvukovou vazbu o stavu vozidla, resp. jeho hardwarového vybavení.

Cena: 44 Kč (31. 5. 2023 [51])



Obrázek 12: Buzzer [10]

4.1.5. 3DR power module

Analogový napájecí modul slouží k stabilnímu napájení zařízení a zároveň umožňuje měření napětí zapojené baterie a spotřeby elektrického proudu. Baterie je zapojena do modulu s čipem, ze kterého jsou pak dále napájeny motory a ze kterého vede zároveň 6pinový výstup, který napájí řídicí jednotku a dále jí poskytuje informace o stavu baterie. Maximální vstupní napětí je 18 V (4S LiPo).

Cena: 140 Kč (31. 5. 2023 [62])



Obrázek 13: Analogový napájecí modul [10]

4.1.6. Rádio

Rádio slouží k navázání spojení mezi řídicí jednotkou a pozemní stanicí. Je to nejjednodušší způsob, jakým lze navázat spojení pro přenos telemetrických údajů o plavidle, protože je jeho firmware speciálně navržen pro fungování s MAVLink pakety (Micro Air Vehicle Link – protokol obsahující informace o stavu plavidla, GNSS polohou, telemetrii atd.) a pro integraci s QGroundControl, Ardupilot a PX4 Autopilotem, tedy softwary, které pro ovládání podporuje řídicí jednotka Pixhawk. Dosah antény je 300 m v základu, ale jde rozšířit na několik kilometrů, protože integrovaná anténa má možnost zapojení externí antény.[31]

Frekvenční pásmo	433 MHz (EU)
Komunikační rozhraní	TTL UART
Maximální dosah (v základu)	300 m
VDD	5 V

Tabulka 10: Parametry Rádía

Cena: 2180 Kč (31. 5. 2023 [62])



Obrázek 14: Radiokomunikace [10]

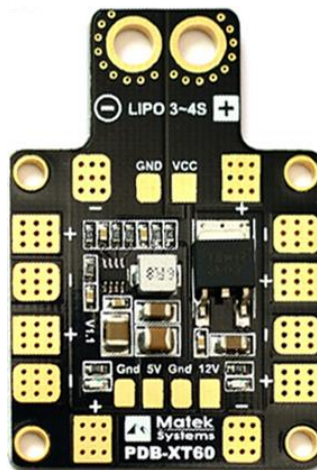
4.1.7. PDB

Matek PDB-XT60 („Power Distribution Board“) neboli distribuční deska slouží k distribuci napětí z baterie do motorů plavidla. Jednotlivé výstupy jsou zapojeny paralelně, což zamezí poruše v případě zkratu některého ze zapojených komponentů.

Vstup	1 x 3S/4S LiPo
Výstup	6 x + a -, 1 x 5 V, 1 x 12 V

Tabulka 11: Parametry PBD

Cena: 199 Kč (31. 5. 2023 [32])



Obrázek 15: Power distribution board [32]

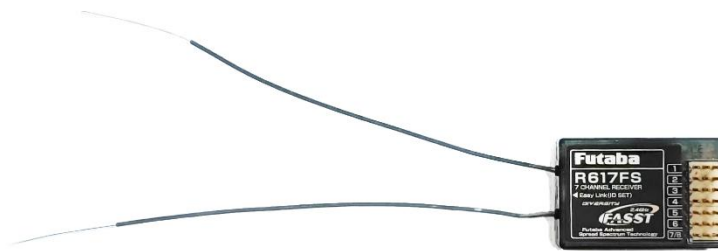
4.1.8. Přijímač rádiového signálu

Futaba R617FS je 7kanálový rádiový přijímač s dvěma anténami, který je továrně propojený s dálkovým RC ovládáním Futaba T6EXP tak, aby nedocházelo k záměně rádiového signálu z jiných ovladačů. Nicméně je možné přijímač spárovat s jiným ovladačem. Pro nejlepší fungování by měli být antény vzájemně umístěny pod úhlem 90°. [33]

Vlnová délka	2,4 GHz
VDD	4,8 V – 6,0 V

Tabulka 12: Parametry rádio přijímače

Cena: přibližně 1 186 Kč (není k dispozici)



Obrázek 16: Přijímač rádiového signálu [10]

4.1.9. Motory

Na plavidle je použita šestice Outrunnerových motorů A2212/13T. To je typ elektromotoru, který je specifický tím, že rotující část motoru (rotor) se nachází vně motoru a uvnitř se nachází statická část motoru (stator). Motor je navržen na 1000 kV, to znamená, že za každý dodaný volt napětí se motor otočí 1000 x za minutu. [34][35]

Cena: 6 x 249 Kč = 1494 Kč (31. 5. 2023 [35])



Obrázek 17: Outrunnerový motor [35]

4.1.10. ESC

Regulátor otáček („Electronic Speed Controller“) je hardwarová součástka, která řídí otáčky motorů podle PWM signálu z řídicí jednotky. Vstup do ESC tedy tvoří pozitivní napětí a zemní potenciál z baterie, resp. z distribuční desky a výstup signálu z řídicí jednotky Pixhawk. Na základě signálu z řídicí jednotky tak ESC určuje, jaký výkon má být motoru dodán v závislosti na napětí a proudu dodaného z baterie.

PWM signál je periodický a má proměnlivou šířku pulzu. Doba trvání pulzu pak určuje hodnotu otáček motoru. Čím delší je doba trvání takového pulzu, tím rychleji se motor otáčí. Běžně se používá rozsah pulzu 1000-2000 mikrosekund.[26][36]

Cena: 6 x 310 Kč = 1860 Kč (31. 5. 2023 [54])



Obrázek 18: Regulátor otáček [10]

4.1.11. Baterie

Plavidlo pohání trojice baterií, jedna 10000mAh a dvě 8000mAh

Počet baterií	1x
Druh	LiPo
Kapacita	10 000 mAh
Počet článků	3 x 3,7V
Nominální napětí	11,1 V
Energie	111 Wh
Maximální proudové zatížení	15 C
Hmotnost	595 g

Tabulka 13: Parametry baterie 1 [55]

Cena: 2599 Kč (31. 5. 2023 [55])

Počet baterií	2x
Druh	LiPo
Kapacita	8 000 mAh
Počet článků	3 x 3,7V
Nominální napětí	11,1 V
Energie	88,8 Wh
Maximální proudové zatížení	15 C
Hmotnost	529 g

Tabulka 14: Parametry baterie 2 [56]

Cena: 2 x 2229 Kč = 4489 Kč (31. 5. 2023 [62])

4.2. Měřicí elektronika

4.2.1. Raspberry Pi 4B

Raspberry Pi 4B je jednodeskový minipočítač počítač vyvinutý firmou Raspberry Pi Foundation. Obsahuje procesor Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 a je schopen bezdrátového připojení k místní síti. Slouží k přijímání dat z externí GNSS aparatury, IMU jednotky a sonaru a využitím naprogramovaného skriptu sbírá a ukládá tato data. Měřená data jsou dále vyhodnocena v post-processingu.

Technické specifikace

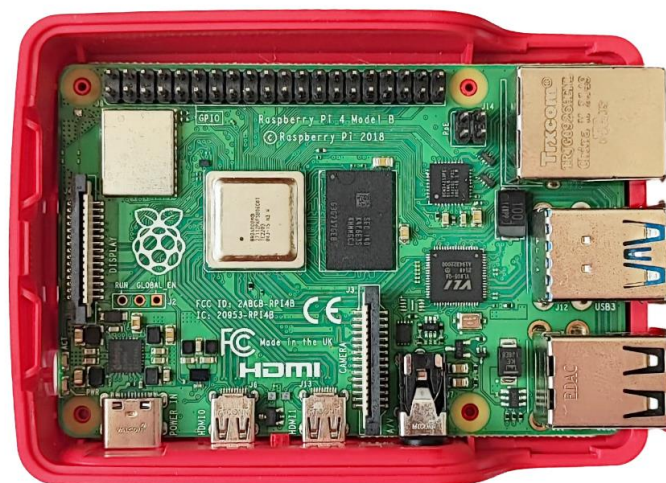
Frekvence procesoru	1,5 GHz
Počet jader procesoru	4 x 64bit
RAM	2 GB
VDD	5 V
Operační teplota	0 °C – +50 °C
Rozhraní	Wi-Fi 2.4 GHz and 5.0 GHz, LAN, Bluetooth 5.0, BLE, Ethernet, 2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0
OS	Raspbian, Ubuntu, Windows 10 IoT Core,

Tabulka 15: Parametry Raspberry Pi 4 model B [41]

BLE – „Bluetooth Low Energy“ je novější druh Bluetooth, který je navržen tak, že je značně snížena jeho spotřeba energie při téměř shodném komunikačním rozsahu, jaký má klasický Bluetooth [42]

Windows 10 IoT Core – verze Windows 10 optimalizovaná pro menší zařízení [44]

Cena: 1369 Kč (31. 5. 2023 [43])



Obrázek 19: Raspberry Pi 4 model B [10]

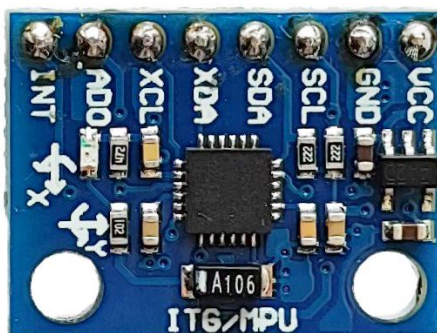
4.2.2. IMU

Dalším zařízením je IMU jednotka s tříosým gyroskopem a akcelerometrem MPU6050, která spadá do stejné rodiny jako IMU jednotka MPU6000, obsažená v řídicí jednotce Pixhawk.[18]

Rozlišení	16 bitů
Rozsah měření akcelerometru	$\pm 2 \text{ g} - \pm 16 \text{ g}$
Rozsah měření gyroskopu	$\pm 250 \text{ }^\circ/\text{s} - \pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$
VDD	2,375 V – 3,460 V
Operační teplota akcelerometru	0 °C do +70 °C
Operační teplota gyroskopu	-40 °C – +85 °C
Komunikační rozhraní	I ² C

Tabulka 16: Parametry MPU6050[18]

Cena: 68 Kč (31. 5. 2023 [45])



Obrázek 20: MPU6050 [10]

4.2.3. GNSS anténa ANT2B-SUR

Výrobce	ArduSimple
Fázové centrum	H: L1, L2: ± 3 mm V: L1: 46,5 mm, L2: 50,5 mm
Podporované GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, NMEA
VDD	3 V – 5,5 V
Operační teplota	-40 °C – +85 °C

Tabulka 17: Parametry antény ANT2B-SUR [46]

Cena: 2114 Kč (31. 5. 2023 [46])



Obrázek 21: ANT2B-SUR [10]

4.2.4. GNSS přijímač

GPS-RTK-SMA Breakout – ZED-F9P je modul od společnosti SparkFun s GNSS přijímačem ZED-F9P od společnosti u-blox.

Podporované GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo
Rozhraní	USB-C, 2 x UART, I ² C, USB 2.0
Konektor antény	SMA
VCC	3,3 V – 5,0 V
Pracovní teplota	-40 °C – +85 °C

Tabulka 18: Parametry GNSS přijímače [47]

Cena: 4888 Kč (31. 5. 2023 [47])



Obrázek 22: SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout – ZED-F9P (Qwiic) [10]

4.2.5. Sonar

Sonar, kterým je plavidlo vybaveno, je AIRMAR Smart senzor ITD800

Maximální hloubkový dosah	180 m
Minimální hloubka pro měření	0,4 m
Přesnost měření	± 20 cm
VCC	9 V
Pracovní teplota	-10 °C – +40 °C

Tabulka 19: Technické parametry sonaru [59]



Obrázek 23: Sonar

4.2.6. Powerbanka

Obvod, ve kterém je zapojen externí GNSS přijímač a sonar, je zapojen samostatně, a proto potřebuje samostatný zdroj elektrické energie. Ten musí, kvůli požadavkům minipočítače, být schopen poskytnout výkon 5 V a minimálně 3 A. Použita je powerbanka Yenkee YPB 1180 RD[58]

Druh	Li-Ion
Kapacita	10 000 mAh
Výstupní napětí / výstupní proud	5 V / 3 A, 9 V / 2 A

Tabulka 20: Parametry powerbanky Yenkee

Cena: 419 Kč (1. 6. 2023 [58])



Obrázek 24: Powerbanka Yenkee

4.2.7. Baterie

Protože sonar potřebuje relativně velké napájecí napětí, je vybaven vlastní baterií Panasonic LC-R121R3PG, která poskytuje požadované nominální napětí

Druh	Pb
Kapacita	1300 mAh
Nominální napětí	12 V

Tabulka 21: Parametry baterie Panasonic

Cena: 482 Kč (2. 6. 2023 [68])



Obrázek 25: Baterie Panasonic [10]

Tabulka ceny použité elektroniky	
Položka	Cena [Kč]
Pixhawk 2.4.8 [kap. 4.1.1]	2 841
GNSS [kap. 4.1.2]	469
PPM enkodér [kap. 4.1.3]	139
Buzzer [kap. 4.1.4]	44
3DR power module [kap. 4.1.5]	140
Rádío [kap. 4.1.6]	2 180
PBD [kap. 4.1.7]	199
Přijímač rádiového signálu [kap. 4.1.8]	1 186
Motory 6x [kap. 4.1.9]	1 494
ESC 6x [kap. 4.1.10]	1 860
Baterie 3x [kap. 4.1.11]	7 088
Raspberry Pi 4B [kap. 4.2.1]	1 369
IMU [kap. 4.2.2]	68
GNSS anténa [kap. 4.2.3]	2 114
GNSS přijímač [kap. 4.2.4]	4 888
Powerbanka [kap. 4.2.6]	419
Baterie [kap. 4.2.7]	482
Celkem	26 980

Tabulka 22: Ceny použitých elektronických komponentů

(Celková cena je orientační, ceny produktů se mohou lišit v závislosti na prodejci. Nejedná se o skutečné náklady, některá elektronika byla poskytnuta katedrou geomatiky.)

5. Konstrukce

V této kapitole je podrobně rozebráno, jakým způsobem byly jednotlivé části plavidla sestaveny dohromady a jak bylo elektronické vybavení plavidla napojeno. Jsou zde popsány součástky, které byly nezbytné pro konstrukci, jednotlivé kroky procesu i úskalí, která s ním byla spojena. Zároveň zde jsou rozebrány výhody i nedostatky konstrukčních částí a komponentů, které byly použity.

5.1. Hlavní trup

Při tvorbě hlavního trupu byla využita technologie 3D tisku. Kvůli jeho délce, která činí 70 cm, nebylo možné na dostupné 3D tiskárně trup vytisknout v celku. Tištěný model byl tedy rozdělen na dvě symetricky dlouhé části, které byly vytištěny zvlášť.

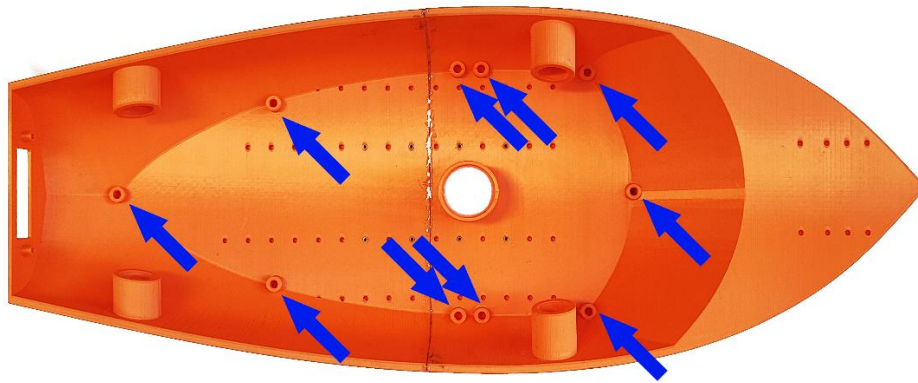


Obrázek 26: Vytištěný hlavní trup plavidla [10]

Využitím elektrické ruční přímé brusky a brusného papíru byl model očištěn od plastových podpor, nezbytných při tisku a byly zahlazeny nedokonalosti které při tisku vznikly. Při očišťování bylo třeba postupovat velmi opatrně, protože v místech, kam se nedá dostat s brusným papírem bylo třeba využít elektrickou brusku. To ovšem mělo neblahé následky na plast, který se i při nejnižších otáčkách brusky začal tavit spíše než brousit. Nicméně rozdíl v rychlosti postupu v porovnání s brusným papírem byl razantní.

Na stranách styku bylo vytištěno 11 otvorů, do kterých byly vloženy několik centimetrů dlouhé a 1,5 mm silné ocelové dráty pro spojení obou částí, aby dodaly plavidlu pevnost v místě, ve kterém by se plavidlo potenciálně mohlo rozlomit. V okamžik, kdy byly obě části k sobě dráty připojeny, byl spoj slepen využitím rychleschnoucího dvousložkového epoxidového lepidla, které je vyráběné speciálně na lepení plastů. Toto lepidlo se běžně využívá v modelářství, protože mezi jeho přední vlastnosti patří pevnost, pružnost a schopnost vyplňování prostoru. To bylo důležité vzhledem ke skutečnosti, že obě poloviny hlavního trupu k sobě nedoléhaly dokonale a v extrémních místech spoje vznikly mezery o velikosti až 2 mm.

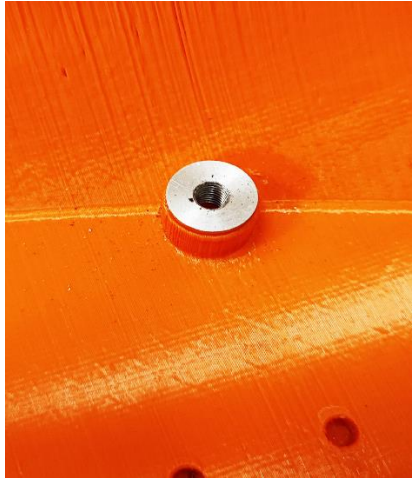
Do deseti otvorů na vnitřní části plavidla byly zapuštěny závitové vložky velikosti M5, které budou sloužit k připevnění svrchního krytu trupu.



Obrázek 27: Schéma zapuštění závitových vložek [10]



Obrázek 28: Závitová vložka M5 [10]



Obrázek 29: Zapuštěný závit [10]

Závitové vložky byly do trupu vloženy tak, že byly nejprve zahřáté horkovzdušnou pistolí na takovou teplotu, aby při kontaktu s trupem zahřály plast, který se následně vlivem tepla stal na krátkou dobu plastickým a vložka vyla vložena do otvoru. Otvor měl menší průměr než vložka, to zajistilo, že bude plast doléhat na vložku po celém obvodu. Nebylo tedy třeba použití žádného lepidla, protože plast po vychladnutí získal zpět svou pevnost.

Z 1 m závitové tyče o průměru M5 bylo odděleno 10 krátkých dílců dlouhých 8,5 cm. Ty byly dostatečně dlouhé, aby po našroubování do zapuštěných závitů krátce vyčnívaly nad trup plavidla a mohly tak na ně být našroubovány těsnění a matice pro přitažení svrchního krytu.



Obrázek 30: Zkrácená závitová tyč [10]

Dále byly obdobným způsobem jako závitové vložky, byly do trupu z obou stran zapuštěny mosazné oboustranné vsuvky 3/4“, které budou sloužit k napojení vedlejších trupů k trupu hlavnímu. Důležité bylo vsuvky zapustit do trupu ve správném směru, který by při montáži plastický plast neudržel. K tomu bylo využito tyče, která byla vsunuta skrz vsuvku a zároveň skrz otvor na druhé straně trupu. Díky tomu byly vsuvky zapuštěny ve správném směru. Po zapuštění byly dodatečně přilepeny dvousložkovým lepidlem na kov, protože zapuštění do plastu nebylo tak efektivní jako v předchozím případě a kolem závitů vložky by se mohla voda dostat do trupu.



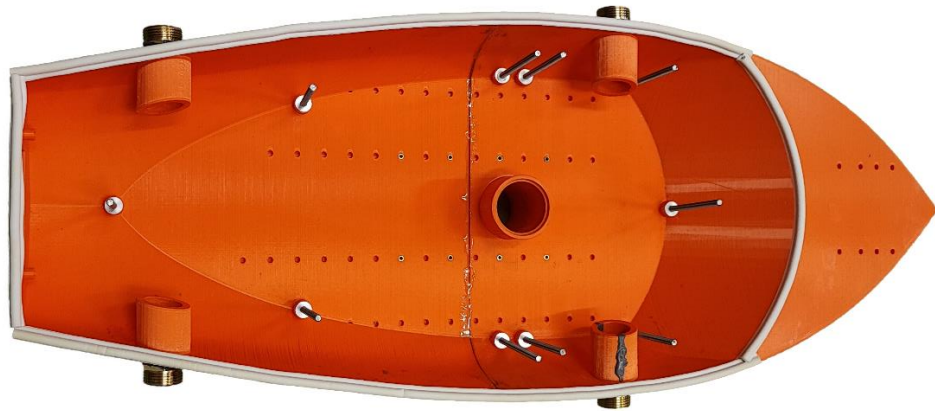
Obrázek 31: Mosazná vsuvka 3/4“ [10]



Obrázek 32: Vsuvka zapuštěná do trupu [10]

V dalším kroku bylo třeba na trup připevnit těsnění, které zajistí, že se na místě styku trupu a svrchního krytu nedostane do plavidla voda. K tomu bylo využito gumové

samolepící těsnění do oken, které je výhodné dobrou stlačitelností a flexibilitou, díky které ho bylo možné nalepit na nepřímý obvod trupu.



Obrázek 33: Hlavní trup s těsněním [10]

Jako svrchní kryt trupu byla vytištěna jedna plocha, která pokrývá otevřenou část trupu. Byl vytištěn ve dvou částech a následně slepený za využití spojovacího podpůrného dílu.

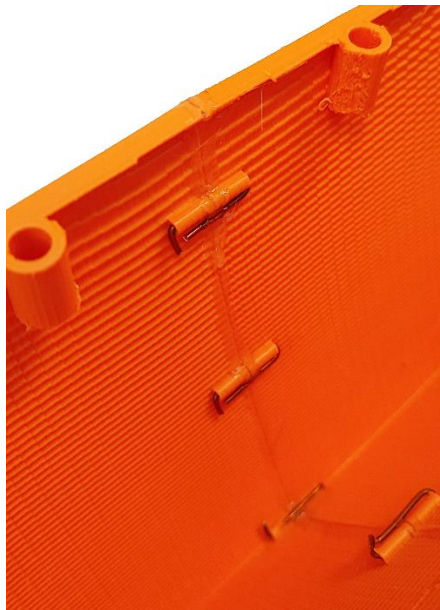


Obrázek 34: Kryt hlavního trupu [10]

Před konstrukcí plavidla byl vytištěn původní neupravený model lodě, aby se ověřilo, zda se produkt 3D tisku udrží na hladině. Nebylo však testováno, jaký bude mít na plavidlo dlouhodobý vliv vody. Celý trup byl proto na závěr ošetřen bezbarvým krycím modelářským lakem, který zajišťuje ochranu trupu před vodou a vytváří na něm tenký a velmi tvrdý povrch.

5.2. Vedlejší trupy

Při sestavování vedlejších trupů se postupovalo velmi podobně, jako v případě trupu hlavního. V první řadě byly modely trupů rozděleny na dvě stejně dlouhé části, tak aby je bylo možné vytisknout v dostupné 3D tiskárně. Následně k sobě byly přední a zadní části připevněny drátem a staženy před tím, než byly vzájemně přilepeny dvousložkovým lepidlem.



Obrázek 35: Spoj vedlejšího trupu [10]



Obrázek 36: Spojený vedlejší trup [10]

Na rozdíl od hlavního trupu zde byly otvory pro zpevňující dráty přístupně umístěny. Díky tomu bylo možné přední a zadní část lépe vzájemně přitáhnout a tím se docílilo minimálních mezer na spoji.

Dále byl trup začištěn od tiskových podpor a nedokonalostí tisku a také od ostrých hran, které tisk vytvořil na vnitřní části, které činili manipulaci s trupem nebezpečnou.



Obrázek 37: Vnitřní hrana před a po zahlazení [10]

Stěny u vedlejších trupů byly tištěny tenčí než u hlavního trupu, a kvůli tom zde byly více patrné nedokonalosti tisku na velkých plochách, které by mohli mít za následek prosakování vody dovnitř trupu. Proto byly kromě ošetření ochranným lakem navíc před tím pokryty modelářským tmelem, který tato místa zaplnil.



Obrázek 38: Použití tmelu na trupy [10]

Jak je patrné z obrázku více, ochrana tmelem rozhodně neměla pozitivní vliv na estetickou složku plavidla, zvláště pak u částí, které při broušení ruční přímou bruskou zčernaly. Proto na ně byla aplikována stříbrná barva a až poté byl aplikován ochranný bezbarvý lak, aby se zamezilo případnému rozpouštění barvy ve vodě a její možné kontaminaci.

Dalším korkem bylo vložení mosazných vsuvek do boku trupu. Aby se zajistila správná poloha vsuvek, byla použita pomocná tyč, která byla vsunuta do již usazených vsuvek v hlavním trupu, na ni byly nasunuty nové vsuvky, které byly zahřáty a následně usazeny do vedlejšího trupu. Poté bylo aplikováno lepidlo na kov pro jistější usazení a utěsnění.

Bylo usazeno 10 závitových vložek do obou trupů v horní části trupů, tím budou k přitažení svrchního krytu stačit obyčejné šrouby a nebude třeba závitové tyče. Po obvodu okraje bylo nalepeno těsnění, stejné jako na hlavním trupu. Protože však zasahovalo svojí stranou přes umístěné závitové vložky, byly do něj udělány otvory. Ty nemají žádný vliv na jeho funkčnost.



Obrázek 39: Otvory v těsnění [10]

Komplikace při sestavování nastaly v okamžiku, kdy byla řešena otázka, jakým způsobem bude svrchní kryt vedlejšího trupu připevněn. Vzhledem k tomu, že krajní část krytu, ve které se nacházely otvory pro šrouby, byly v sešikmené části, která byla od vodorovné roviny pod úhlem přibližně 30° , bylo třeba vyřešit, jak přišroubovat kryt a zároveň utěsnit prostor kolem šroubu od vody. Nejprve byly pod šrouby použity obyčejné gumové těsnící podložky, na kterých byly zároveň i ocelové podložky. Teoreticky by se měly podložky pod tlakem šroubu přizpůsobit šikmé rovině. To se ukázalo do jisté míry jako pravda, nicméně podložky se nedokázaly přizpůsobit dokonale a těsnění nedoléhalo po celém obvodu šroubu. Dalším nápadem bylo použít gumovou podložku, která je vyšší a na jedné straně ji seříznout pod takovým úhlem, jaký má šikmá rovina krytu. Problémem bylo, že pro tak strmý úhel by bylo třeba požit velmi vysokou podložku. Takové podložky se však běžně nevyrábí a bylo třeba vymyslet, čím podložku nahradit. Jako vhodná alternativa se ukázaly být gumové dřevní zarážky, které byly dostatečně vysoké a materiál, ze kterého byly vyrobeny by dokázal odizolovat otvor od vody. Byly tedy na jedné straně seříznuty pod požadovaným úhlem a připevněny i s plochou gumovou a ocelovou podložkou s krytem k vedlejšímu trupu.



Obrázek 40: Způsob těsnění šikmého krytu [10]

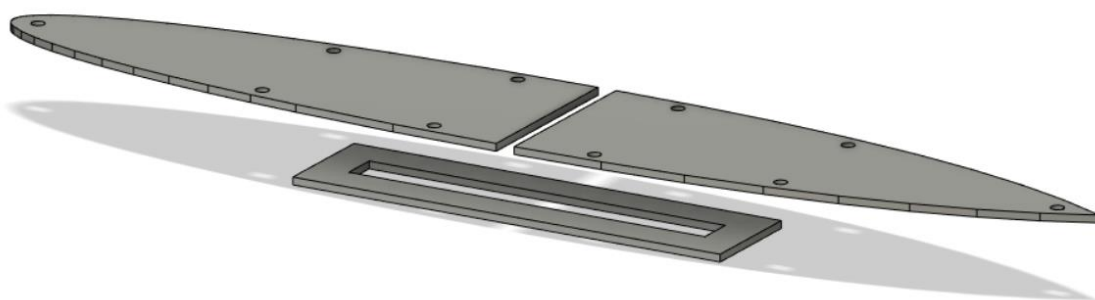
Stěny vedlejšího trupu byly vytištěny tenčí než stěny hlavního trupu. To se ukázalo jako nedostatečné v okamžiku, kdy byly šrouby dotahovány, aby svrchní kryt držel dostatečně pevně. Mohla to být kombinace několika různých faktorů, že síla vyvolaná dotahováním byla rozložena tak, že bok trupu začal prskat.



Obrázek 41: Prasklina trupu [10]

Šroub s těsněním byl proto okamžitě sundán a prasklina trupu byla z vnější i vnitřní strany řádně zalepena již dříve použitým epoxidovým lepidlem na plast.

Vzhledem ke komplikacím, které při realizaci bočních krytů zdánlivě stále přibývaly, bylo rozhodnuto remodelovat svrchní kryt na jednoduchou plochu, která pokryje celý trup a bude jednoduchá na montáž s obyčejným těsněním. Kryt byl vymodelován dostatečně vysoký (4 mm), aby se zamezilo praskání plastu při namáhání. Zároveň byla vytištěna i podpora, která bude sloužit jako spoj přední a zadní části krytu, které musely být kvůli velikosti vytištěny odděleně.



Obrázek 42: Nový model krytu vedlejšího trupu[9]

5.3. Spojení trupů

Při řešení otázky, jakým způsobem vyřešit spojení hlavního trupu s trupy vedlejšími, bylo třeba zohlednit několik požadavků na tyto spoje. Bylo jasné že spoje budou realizovány trubkami. Trubky, musejí být dostatečně široké, aby uvnitř mohlo být vedeno zapojení pohonu z hlavního trupu a přívod napájení z baterií ve vedlejších trupů do řídicí jednotky v hlavním trupu. Dále bylo třeba vybrat vhodný materiál, který bude zároveň dostatečně pevný, aby nebyl deformován možným namáháním, ale zároveň lehký, aby zbytečně nezvyšoval celkovou hmotnost celého plavidla.

Vybrány byly tyče z pleteného uhlíkového vlákna o průměru 2 cm. Ty svými vlastnostmi ideálně splňují zmíněné požadavky a průměr 2 cm bude dostatečný na to, aby uvnitř bylo možno vést veškerou kabeláž. Pořízeny byly dvě tyče, každá o délce 1 m. Tím, po jejich rozpůlení, dostaneme čtyři stejné, dostatečně dlouhé tyče, které zajistí potřebnou vzdálenost vedlejších trupů, pro stabilitu plavidla.

Půlení karbonové tyče není obecně ideální, protože pevnost jí propůjčuje hlavně skladba jednotlivých uhlíkových vláken. Tato vlákna se však při řezání mohou začít rozvolňovat. Prodejcem bylo doporučeno při řezání například úhlovou bruskou použít co nejvyšší možné otáčky. Použita byla elektrická přímá bruska, která nabízí více stupňů rychlosti otáčení. Byl do ní usazen drobný a velmi jemný brusný kotouč a po uříznutí na nejvyšší otáčky nebyla na okrajích trubky viditelná žádná degradace vláken, která by indikovala možnost jejich budoucího třepení.

Trubice svým průměrem takřka perfektně pasuje do 3/4“ mosazných vsuvek, použitých na stranách všech tří trupů. K tomu, aby bylo možné trubky přimontovat k vsuvkám byly použity 3/4“ mosazné nátrubky



Obrázek 43: Mosazný nátrubek 3/4“ [10]

Vzhledem k tomu, že šířka trupů se v přední a zadní části liší, bylo třeba zajistit, aby při nasazení trubek boční trupy směřovaly stále v přímém směru s hlavním trupem. Bylo změřeno o kolik centimetrů by bylo třeba přední trubky (vzdálenost mezi trupy je vpředu menší) zasunout více do zapuštěných vsuvek, aby osa trupů byla rovnoběžná. K tomu, aby se zajistilo, že trubky nebudou zasunuty hlouběji, než je třeba, byly na 3D tiskárně vytištěny tenkostěnné kroužky s vnitřním průměrem 2 cm (stejný průměr jako vnější průměr trubek), které byly následně přilepeny na trubky a slouží jako zarážka.

Na nátrubky byly na straně opačné od směru k vsuvce nalepeny širší vytištěné plastové kroužky, které mají vnitřní průměr také 2 cm. Tím se docílilo toho, že při šroubování nátrubku na vsuvku nátrubek přemostí užší zarážkový kroužek a trubky se dotáhnou v zamýšlené vzdálenosti a nátrubky jsou v opačném případě „na volno“ na karbonové trubce.



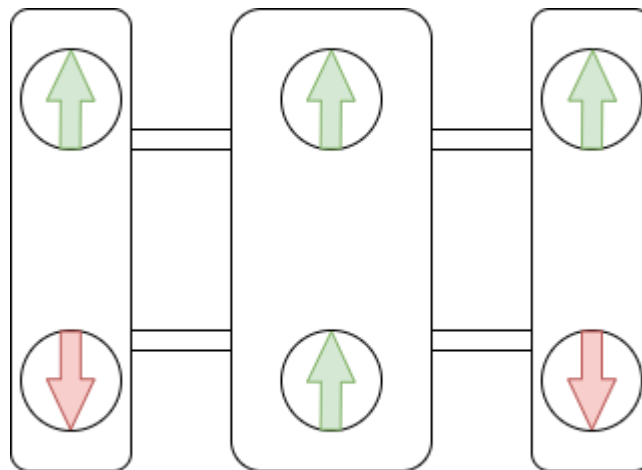
Obrázek 44: Nátrubky se zářčkovým kroužkem [10]



Obrázek 45: Trubky se zářčkovým kroužkem [10]

5.4. Motory

Při koncepci plavidla bylo dohodnuto, že plavidlo s šesticí motorů bude mít čtyři motory směřující kupředu a dva motory opačným směrem, aby umožnili plavidlu otáčet se.



Obrázek 46: Schéma rozložení motorů [40]

Když byly kryty na motory vytištěny na 3D tiskárně, nejprve do nich byly motory vloženy, aby se vyzkoušelo, zda otvory v zadní části krytu polohově odpovídají závitovým otvorům na motorcích a dále bylo vyzkoušeno, zdalipak má motor dostatečný prostor na otáčení. Jelikož se jedná o outrunnerový motor, tak otáčející se část motoru se nalézá vně motoru a v případě, že motor nemá kolem sebe dostatečný prostor, resp. svou stranou přímo doléhá na vnitřní stranu krytu motoru, tak by nebyl schopen se plně otáčet, kvůli vysokému odporu tření. U většiny krytů bylo kvůli nedokonalosti tisku třeba vnitřní stranu krytu kolem motoru zabrousit. Totéž platilo i o otvorech pro šrouby, které ne vždy přesně lícovali se závitovými otvory motorků, zde tedy byly otvory broušením rozšířeny, aby motor mohl být lehce usazen. Byl to doslova iterační proces, protože když byl motor schopen se dobře otáčet, tak otvory pro šrouby byly ve špatné pozici a v okamžik kdy byl motor dobře usazen na otvory, tak se část stěny dotýkala krytu a brzdila otáčení. Postupným dobroušením se tedy upravily kryty, dokud se motory nebyly schopny bez potíží otáčet.



Obrázek 47: Broušením upravený kryt motoru [10]

Při tomto procesu bylo opět velmi obtížné „čistě“ kryt zbrousit, protože pro práci byla použita přímá bruska, která má tendence rychlostí otáčení plast krytu tavit, spíše než brousit. Proto byl celkově tento proces velmi zdlouhavý.

Kryty motorů mají ve spodní části otvor, kterým jsou svedeny kabely na napájení motoru. V dalším kroku bylo třeba polohu těchto otvorů přenést na svrchní kryty trupů, kam byly kryty následně přilepeny. Poloha každého z otvorů byla předem pečlivě rozměřena, protože bylo důležité, aby zaprvé motory byly v ose trupů a zadruhé, aby byly též natočeny rovnoběžně s osou. Do krytů trupů byly vyvrtány malé otvory (pro orientaci umístění) a kryty motorů byly přilepeny na své místo. Následně byly otvory v krytu trupů rozšířeny na požadovanou velikost, aby jimi bylo možné kabely motorů vést.

V poslední řadě byly motory usazeny do krytů, a byla k nim připevněna vytištěná vrtule.



Obrázek 48: Připevněný kryt s usazeným motorem [10]

Tabulka ceny použitých komponentů	
Položka	Cena [Kč]
Epoxidové lepidlo 1x	409
PLA filament	1287
Závitové vložky 10x	345
Závitová tyč 1x	79
Mosazné vsuvky 8x	336
Lepidlo na kov 1x	279
Těsnění na okna 1x	179
Krycí lak 1x	261
Modelářský tmel 1x	119
Šrouby 20x	30
Matice 10x	4
Gumové těsnící podložky 30x	144
Ocelové podložky 30x	35
Mosazný nátrubek 8x	552
Karbonová tyč 2x	1278
Celkem	5337

Tabulka 23: Ceny použitých komponentů

(Jedná se o cenu komponentů, za kterou byly reálně pořízeny při konstrukci plavidla.)

5.5. Zapojení elektroniky

5.5.1. Zapojení pohonu

GNSS přijímač

Výchozím bodem napojení elektronických komponentů byla řídicí jednotka Pixhawk 2.4.8. Nejprve byl do jednotky zapojen GNSS přijímač do GPS portu a nepřímo do I²C portu přes rozvodovou desku („Expand module“), umožňující připojit na I²C port více zařízení, přičemž z portu využívá pouze SLC a SDA piny.

GPS Port		
Pin	Signál	Napětí
1 (červený)	VCC	+5 V
2 (černý)	TX	+3,3 V
3 (černý)	RX	+3,3 V
4 (černý)	CAN2 TX	+3,3 V
5 (černý)	CAN2 RX	+3,3 V
6 (černý)	GND	GND

Tabulka 24: GPS Port – rozložení pinů[15]

VCC – „Voltage Common Collector“ je označení pro signál který poskytuje napájecí napětí elektronickým komponentům a obvykle se jedná o kladný pól, který je připojen k napájecímu zdroji.

TX – „Transmit“ je označení pro výstupní signál, kterým probíhá přenos dat z jednoho zařízení do druhého.

RX – „Recive“ je vstupní signál, který přijímá data z jiného zařízení a spolu s TX vytváří sériovou komunikační linku

CAN2 TX – Výstupní signál, sloužící k přenosu dat v rámci sběrnice CAN („Controller Area Network“), což je sériový komunikační protokol.

CAN2 RX – Vstupní signál k příjmu dat ze směrnice CAN. Data přijatá na tomto pinu jsou dostupná k dalšímu zpracování v příslušném zařízení

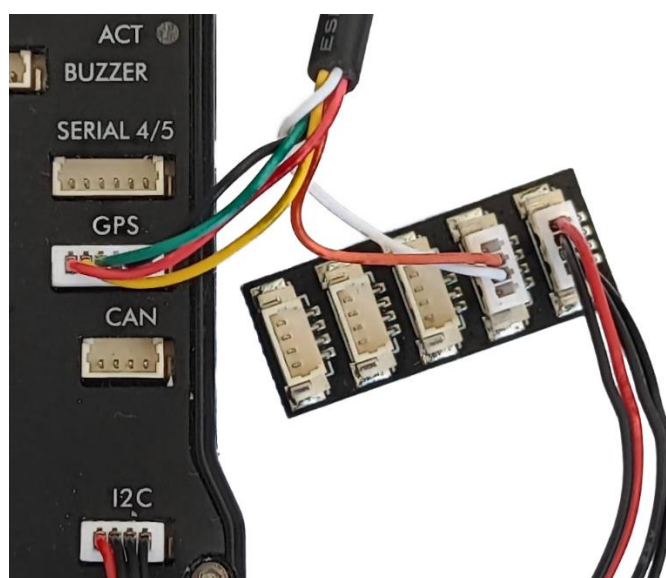
GND – „Ground“ je zemní vodič. Slouží k uzavření elektrického obvodu a obvykle jde o negativní pól.[39]

I2C		
Pin	Signál	Napětí
1 (červený)	VCC	+5 V
2 (černý)	SLC	+3,3 V
3 (černý)	SDA	+3,3 V
4 (černý)	GND	GND

Tabulka 25: I2C – rozložení pinů[15]

SLC – „Serial Clock Line“ se používá při komunikaci mezi zařízeními, která podporují komunikační protokol I2C, určuje časování přenosu dat mezi a synchronizuje komunikaci mezi nimi.

SDA – „Serial Data Line“ slouží k přenosu dat mezi zařízeními.[15][39]



Obrázek 49: Zapojení GNSS [10]

PPM enkodér

PPM enkodér byl zapojen do RCIN vstupu s třemi piny -, +5 V a signál (analogový) a následně k němu byla připojena rádio anténa RC ovládání s osmi kanály pro příjem signálu dálkového ovládání.[15]



Obrázek 50: Zapojení PPM enkodér – Pixhawk [10]



Obrázek 51: Zapojení PPM enkodér – rádio anténa [10]

Analogový napájecí modul

Dalším zapojeným komponentem byl napájecí modul, kterým je z baterií přiváděn elektrický proud. Výstupy modulu jsou 6pinová koncovka a koncovka XT-60 pro připojení k distribuční desce.

Analogový napájecí modul		
Pin	Signál	Napětí
1 (červený)	VCC	+5 V
2 (černý)	VCC	+5 V
3 (černý)	CURRENT	<3,3 V
4 (černý)	VOLTAGE	<3,3 V
5 (černý)	GND	GND
6 (černý)	GND	GND

Tabulka 26: Analogový napájecí modul – rozložení pinů [15]

CURRENT – Umožňuje měření proudu, který je modulem protéká.

VOLTAGE – Umožňuje měření napájecího napětí.

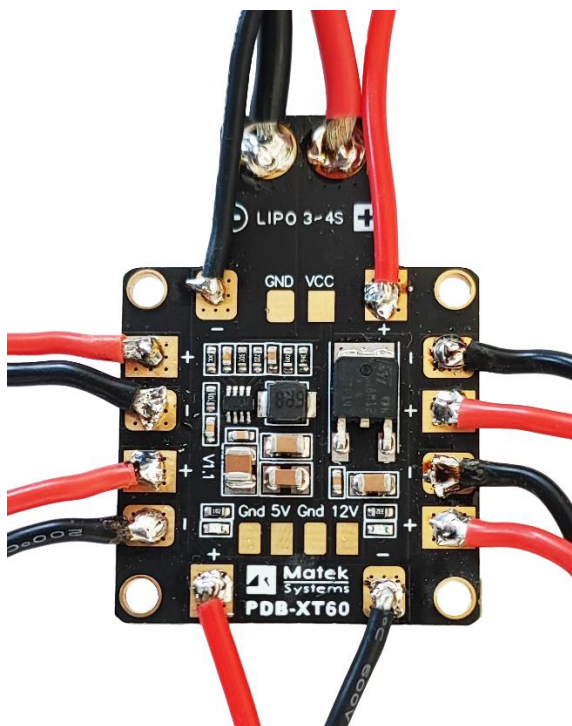
Piny VCC a GND jsou na modulu dvakrát z důvodu zvýšení proudové kapacity



Obrázek 52: Zapojení napájecího modulu [10]

Distribuční deska

Z napájecího modulu je kabely + a – veden proud do vstupu distribuční desky 3S/4S LiPo, odkud je rozdělován do jednotlivých motorů plavidla.



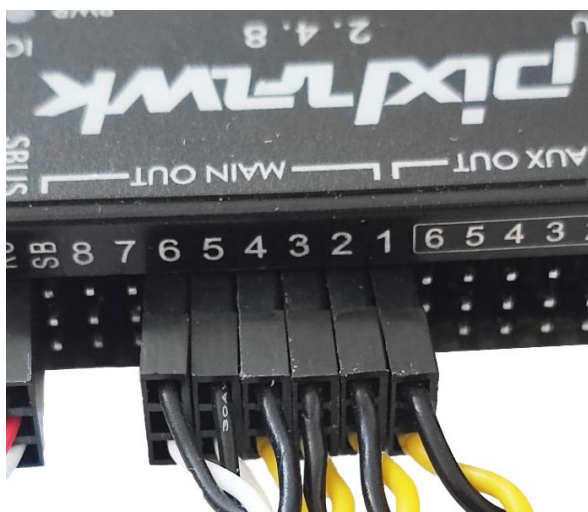
Obrázek 53: Zapojení PDB [10]

Motory

V obvodu mezi distribuční deskou a motory jsou zapojeny regulátory otáček. Ty mají na svém vstupu + a - z distribuční desky a - a PWM signál z řídicí jednotky Pixhawk, kterými je upravováno vstupní napětí a proud, které mají být motoru dodány. Na výstupu je třífázový vodičový systém, který vytváří střídavý proud a regulátor přepíná proudy v těchto vodičích ve správném čase, aby se motory otáčely.[15][26][36]



Obrázek 54: Zapojený regulátor otáček [10]



Obrázek 55: Výstup signálu z Pixhawk do regulátoru otáček [10]



Obrázek 56: Zapojení regulátoru otáček do motoru [10]

Rádio

Rádio anténa, která slouží k přenosu telemetrických údajů o plavidle je do řídicí jednotky připojena 6pinovým portem.

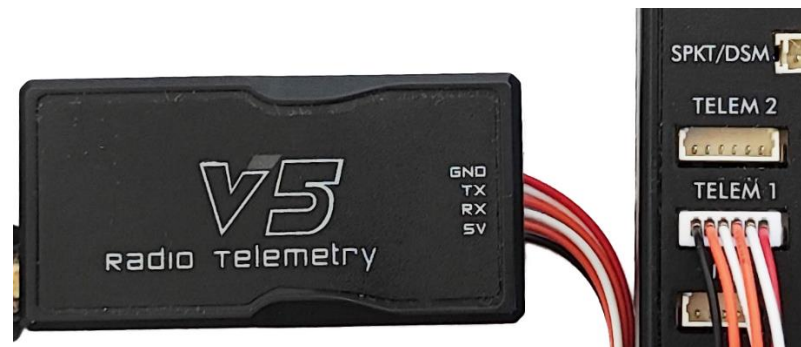
Rádio		
Pin	Signál	Napětí
1 (červený)	VCC	+5 V
2 (bílá)	TX	+3,3 V
3 (oranžová)	RX	+3,3 V
4 (bílá)	CTS	+3,3 V
5 (oranžová)	RTS	+3,3V
6 (černý)	GND	GND

Tabulka 27: Rádio – rozložení pinů[15]

CTS – „Clear To Send“ signál je používán k řízení toku dat mezi zařízeními. Je-li aktivní, znamená to, že přijímač je připraven přijímat.

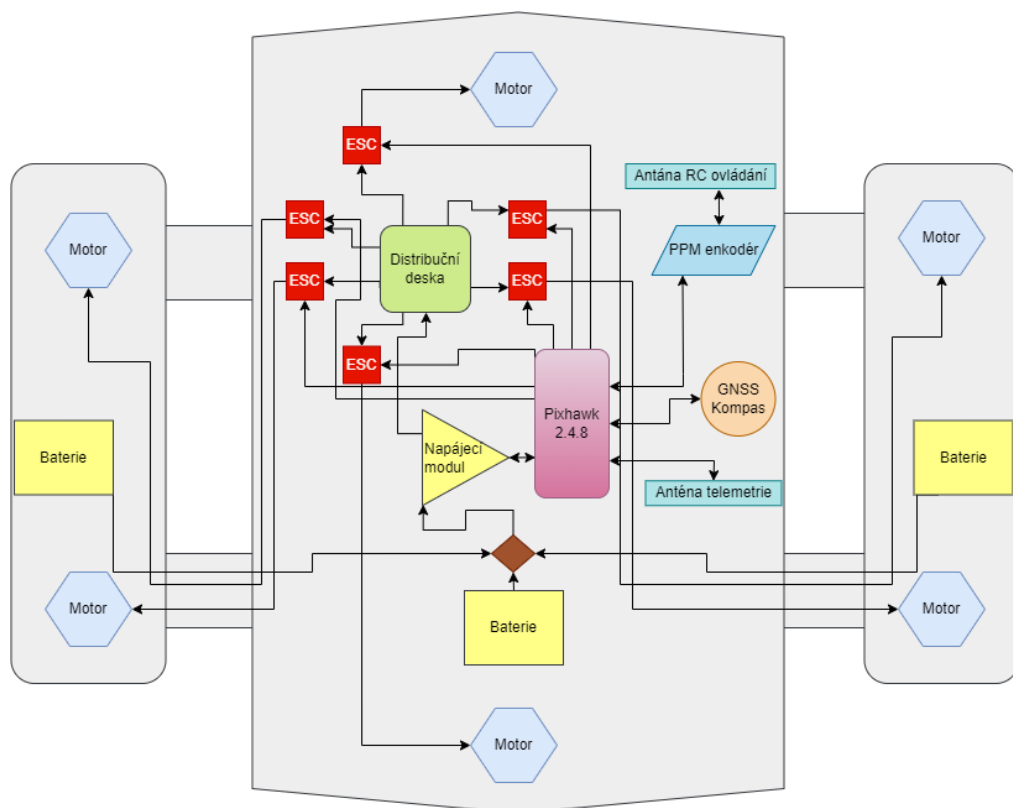
RTS – „Request To Send“ signál je také používán k řízení toku dat mezi zařízeními. Je-li aktivní, znamená to, že odesílající strana je připravena data odesílat.

Oba signály jsou součástí standardu RS-232, který byl definován k řízení a časování signálů mezi počítači.[37][38]



Obrázek 57: Zapojení Rádia [10]

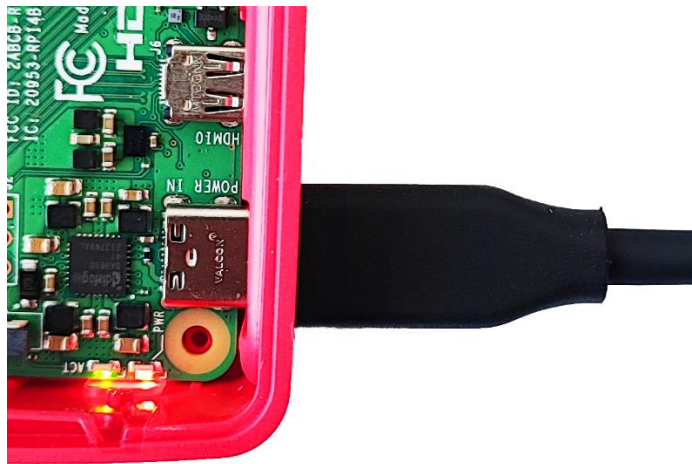
Diagram celkového zapojení pohonu



Obrázek 58: Diagram zapojení pohonu[40]

5.5.2. Zapojení měřící elektroniky

Při zapojení pohonu byla ústředním bodem řídicí jednotka Pixhawk. Zapojení sonaru a přijímače GNSS je samostatné a naprosto nezávislé na elektronice, která je již zapojená. Hlavním bodem obvodu je zde jednodiskový minipočítač Raspberry Pi4 B. Ten vyžaduje, z důvodu vyššího výkonu, silnější napájení skrz napájecí adaptér s výkonem 5 V a minimálně 3 A. To splňuje vybraná powerbanka, která přes USB-C konektor, zajistí dostatečné napájení.[41][58]



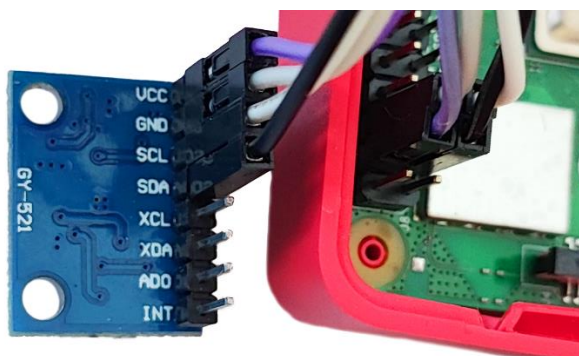
Obrázek 59: Napájení Raspberry Pi4 B [10]

IMU jednotka

Do minipočítače je dále zapojena IMU jednotka čtveřicí pinů.

IMU jednotka		
Pin	Signál	Napětí
1 (červený)	VCC	5 V
2 (černý)	GND	GND
3 (bílý)	SCL	3,3 V
4 (bílý)	SDA	3,3 V

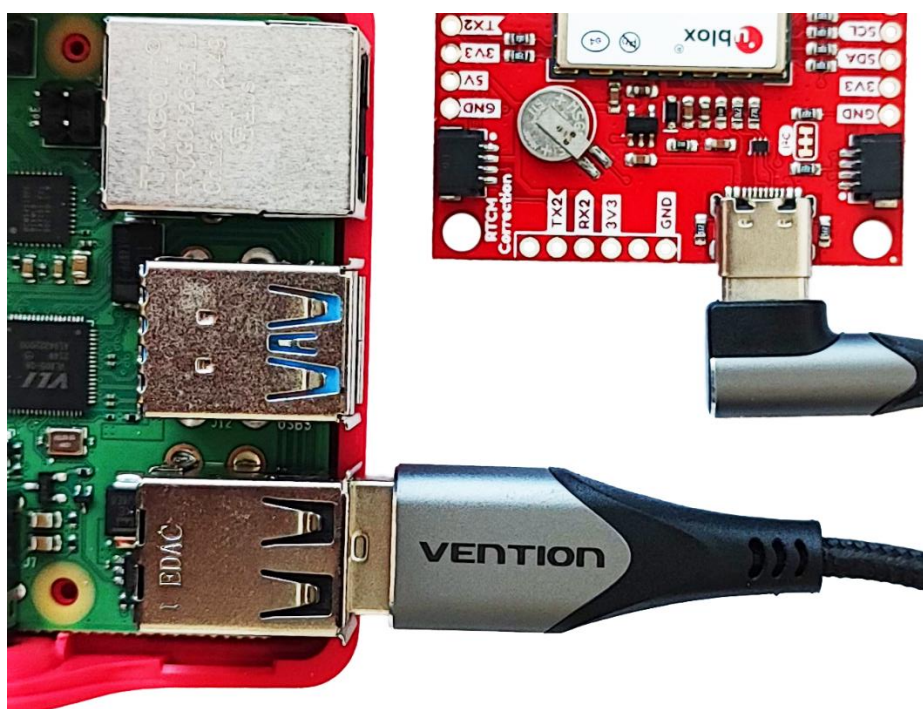
Tabulka 28: IMU jednotka – rozložení pinů



Obrázek 60: Zapojení IMU [10]

GNSS přijímač

Dále je do minipočítače zapojen GNSS přijímač u-blox skrz kabel s USB 3 konektorem v minipočítači a USB C konektorem v přijímači.



Obrázek 61: Zapojení GNSS přijímače [10]

GNSS anténa

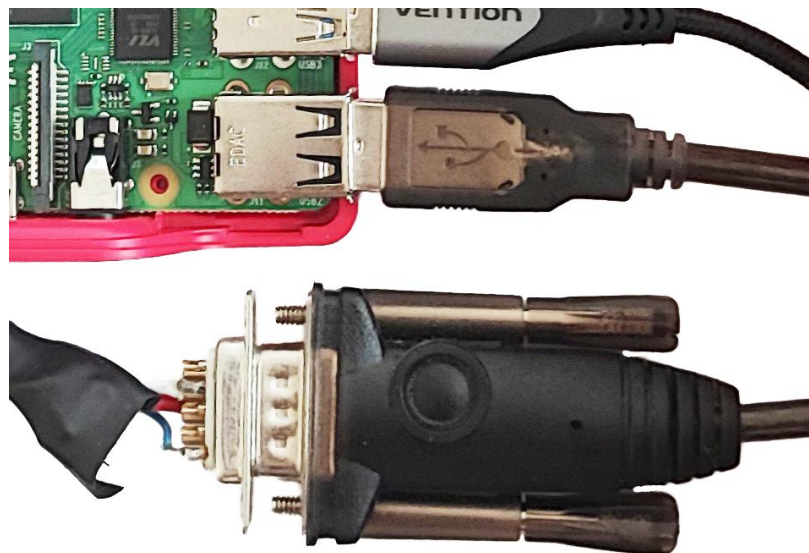
K přijímači u-blox je anténa připojena redukčním kabelem s IPX koncovkou na u-bloxu a RP SMA koncovkou na anténě.



Obrázek 62: Zapojení u-blox – GNSS anténa [10]

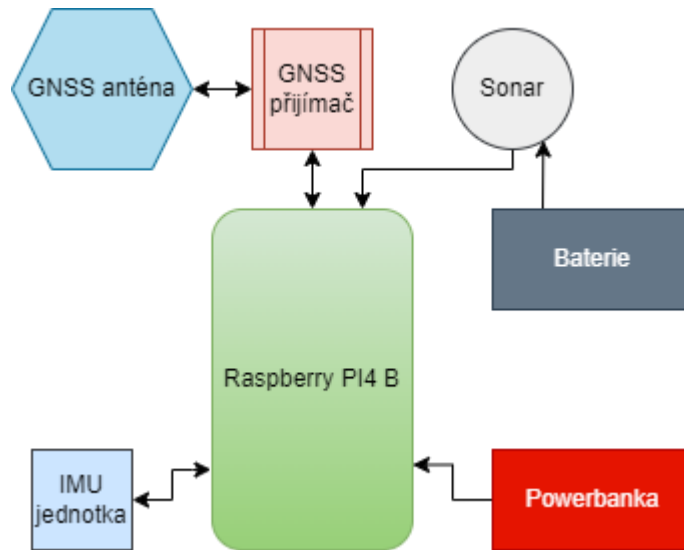
Sonar

Výstupním portem ze sonaru je sériový port. Redukčním kabelem ze sériového portu na USB 2 je sonar připojen k minipočítači Raspberry.



Obrázek 63: Zapojení sonar – Raspberry [10]

Diagram celkového zapojení měřících přístrojů



Obrázek 64: Diagram zapojení měřících přístrojů



Obrázek 65: Připojení antény GNSS na plavidle[10]

6. Software

6.1. Software pro měření

Pro měřicí aparaturu (GNSS, sonar) byl zkompileován kód v programovacím jazyce Python a s využitím RealVNC – virtuálního prostředí pro připojení k aparatuře Raspberry, byl implementován do minipočítače Raspberry PI4 B.[66][67]

Popis skriptu

Po spuštění minipočítače (dále jen počítače) začnou anténa GNSS, IMU jednotka a sonar posílat měřená data, která počítač sice již přijímá, ale zatím nečte. Main soubor spustí skript k synchronizaci času s GNSS, kterým se GNSS připojí přes sériový port a skrze ten se začnou číst zprávy, které přicházejí z GNSS přijímače, ve kterých jsou vyhledávány NMEA zprávy, které obsahují časový údaj. Tento časový údaj je následně nastaven jako systémový čas počítače a synchronizace je hotova.

V dalším kroku program funkcí (kill_process_using_device) odpojí sériový port od počítače a tím se zprávy přestanou číst. Poté je vytvořen nový textový soubor (BoatMeasurement), do kterého budou zapisovány časové údaje (rok, měsíc, den, hodina, minuta).

Skript pak vyzve k napsání příkazu „start“, kterým se měření spustí. Příkaz je vyvolán z klasického počítače skrz virtuální prostředí RealVNC.

S využitím aplikace Ing. Štěpána Hodíka se začnou vytvářet .ubx zprávy, do kterých je zapisováno měření z GNSS přijímače a to každou vteřinu. Tyto zprávy jsou pak v post processingu převedeny do RINEX souborů. Sonar měří každou vteřinu a ve chvíli měření do záznamu převezme aktuální čas počítače.

V post processingu tedy budou data z GNSS převedeny do RINEX souborů a je vypočítána poloha sonaru v každé vteřině. Poloha je vypočítána tak, že z časového údaje měření sonaru se vyinterpoluje jeho poloha v době měření GNSS. Ve chvíli, kdy známe polohu sonaru, je zavedena korekce z náklonu IMU jednotky a následně je dopočtena poloha bodu na dně.

6.2. Software pro ovládání plavidla

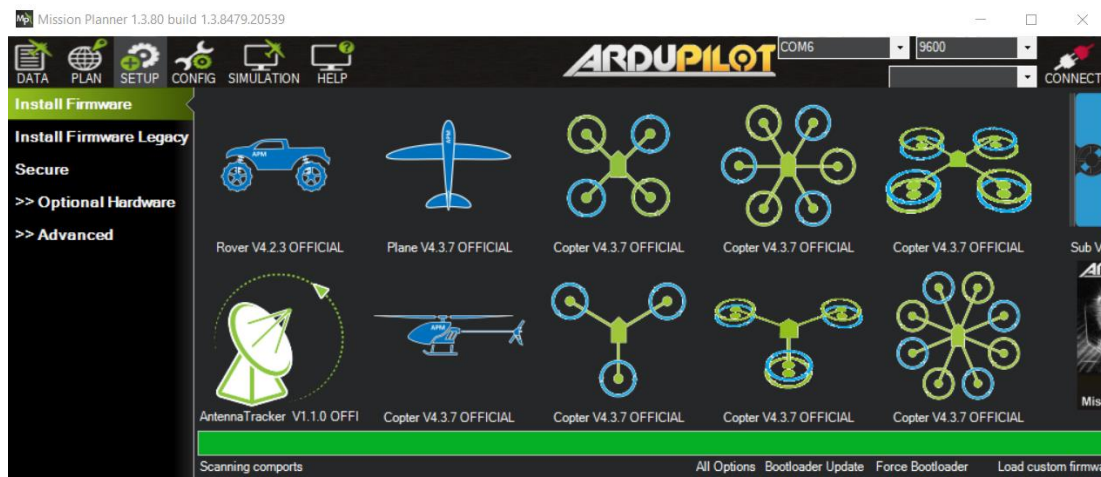
Pixhawk 2.4.8 operuje na open-source autopilotním firmwaru PX4, který je navržen pro řízení bezpilotních systémů. Ten je díky své otevřenosti kompatibilní s řadou softwarových aplikací, které umožňují různými způsoby operovat s tímto firmwarem. Mezi nejpoužívanější aplikace se řadí Mission Planner a QGroundControl.

6.2.1. Mission Planner

První aplikací, která byla použita při nastavování bezpilotního plavidla, je Mission Planner. Tato aplikace vyvinutá pro Windows je navržena pro inicializaci a konfiguraci hardwaru a umožňuje kromě nastavení hardwarových komponentů také sledování stavu a polohy UAV systémů, plánování trasy, kterou má plavidlo provést, a také simulaci takové cesty.

Nejprve bylo třeba provést kalibraci senzorů jednotky Pixhawk a dalších připojených elektronických komponentů. Jednotka Pixhawk má jako vstup pro připojení k PC USB micro. Součástí balení jednotky byl konvertorový USB micro na USB 2.0 kabel. Avšak Pixhawk jako komunikační rozhraní vyžaduje sériový port. Možnost zapojení sériovým portem ale většina moderních notebooků již neumožňuje a notebook na kterém byl dělán iniciální setup nebyl výjimkou. Tato komplikace se však dala obejít softwarovým řešením a to tak, že jsou volně dostupné a stažitelné drivery, které dokáží přimět USB port, aby se tvářil a komunikoval jako sériový port.[61]

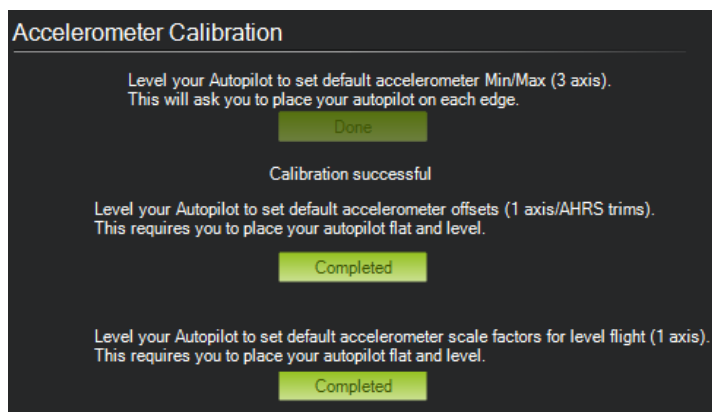
Následně byl spuštěn Mission Planner a Pixhawk byl připojen k PC zatím bez připojení jakékoliv dodatečné elektroniky. První věc, kterou Pixhawk požaduje je výběr kostry, resp. o jaký prostředek (rover, dron, letadlo, ...) se jedná a případně kolik motorů má a jak jsou rozmístěny.



Obrázek 66: Výběr kostry prostředku

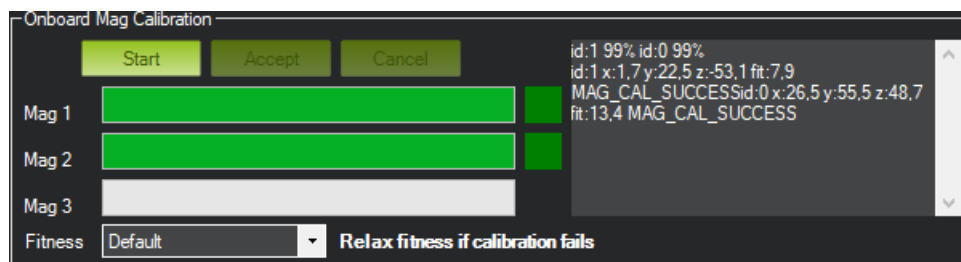
Jelikož naše plavidlo je sestaveno se šesti motory, byla vybrána kostra dronu, který s šesti motory operuje. Výběr pojízdného roveru či letadla v úvahu nepřipadal, jelikož tyto prostředky využívají k změně směru servomotory, které fungují tak, že na rozdíl od běžného motoru dokáží nastavit přesnou polohou natočení osy. Na druhou stranu dron pro let i změnu směru letu využívá pouze bezkartáčové motory, u kterých se rotor otáčí kolem dokola statoru. Směr pohyb je pak měněn změnou intenzity otáčení jednotlivých motorů. V okamžik, kdy byl vybrán firmware stáhnut a nahrán na řídicí jednotku, Mission Planner rozeznal připojenou jednotku jako dron a bylo možné pokračovat v kalibraci senzorů.[62][63]

Prvním senzorem, který byl kalibrován byl akcelerometr. Pro nastavení akcelerometru bylo třeba řídicí jednotku natočit na každou z šesti stran (nalevo, na zadní stranu, vzhůru nohama, ...) Tím vším uživatele Mission Planner jednoduše provede a akcelerometr byl kalibrován.



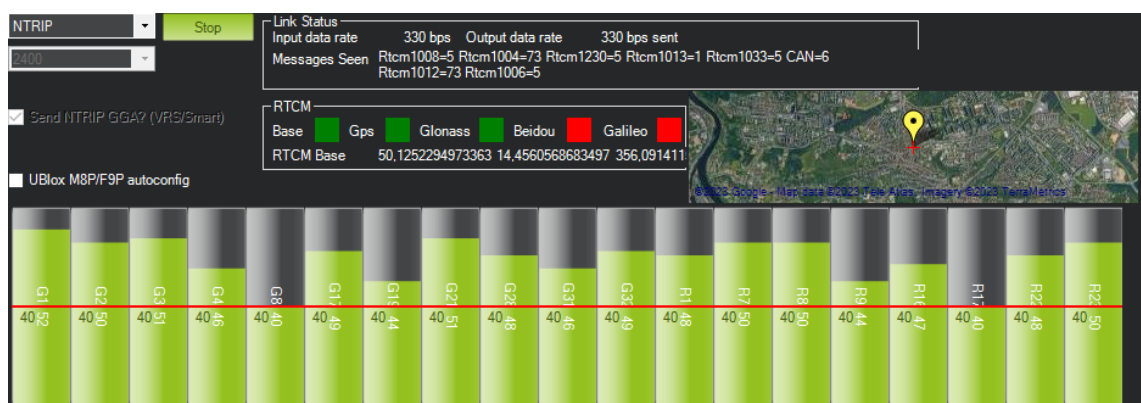
Obrázek 67: Kalibrace akcelerometru

Dalším senzorem, který byl kalibrován byl kompas. Kompas obsahuje i připojitelný GNSS přijímač. Ten byl proto k řídicí jednotce připojen. Pixhawk i GNSS přijímač mají daný přímý směr, který je na vrchní straně signalizován šipkami. Aby kalibrace proběhla správně, bylo třeba, aby šipky neustále směřovaly stejným směrem. Když byl směr obou senzorů sjednocen, byla spuštěna kalibrace a přístroji bylo otáčeno všemi směry a okolo všech os otáčení. Postup kalibrace byl znázorněn procentuálně, samostatně pro oba kompas, a v okamžik, kdy byla zařízení otočena všemi požadovanými směry, kalibrace byla 100% hotova.



Obrázek 68: Kalibrace kompasů

V tom okamžiku, kdy byl připojen GNSS přijímač, byla zároveň vyzkoušena i funkce připojení k referenční stanici pro přesnější RTK sledování polohy, využitím adresy pro připojení, kterou poskytla katedra geomatiky.



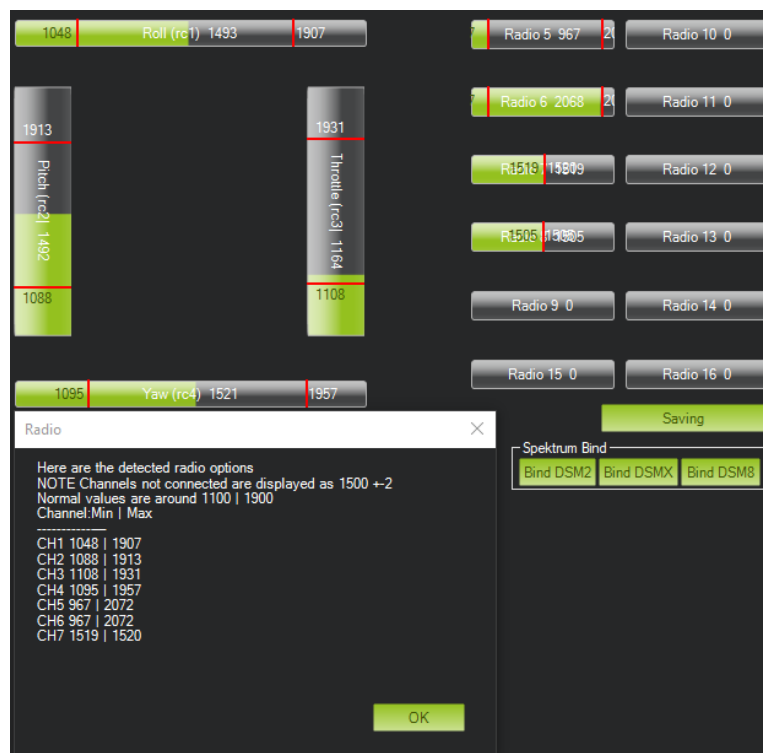
Obrázek 69: Aktivní GNSS RTK připojení



Obrázek 70: Poloha zařízení s aktivním RTK připojením

Následně byl do řídicí jednotky připojen PPM enkodér se zapojeným přijímačem radiového signálu dálkového ovládání a byla provedena kalibrace dálkového ovládání. Pro tu bylo třeba spustit dálkové ovládání a nechat rádiový přijímač s dálkovým ovládáním navázat spojení. To, že spojení bylo navázáno, bylo indikováno na přijímači zeleně svítící led diodou, která vystřídala červeně svítící indikaci stavu bez spojení.

Po spuštění kalibrace bylo třeba pohybovat ovládacími prvky každého kanálu do extrémních poloh a ty byly po provedení kalibrace pro jednotlivé kanály vypsány.



Obrázek 71: Kalibrace dálkového ovladače

Hardwarová komplikace

Poté, co se podařilo kalibrovat ovladač, přestal program odpovídat na input z ovladače. Řídící jednotka proto byla odpojena od počítače, znovu připojena a bylo vyzkoušeno ovladač zkalibrovat znovu. Program opět přijímal signály z ovladače, ale přestal na ně odpovídat ještě během kalibrace, proto byla zkontrolována správnost zapojení všech zařízení, která však nevykazovala známky špatného zapojení. Avšak PPM enkodér, který přijímal a moduloval signál z radiopřijímače byl extrémně horký. Bez předchozí zkušenosti s fungováním enkodéru byl stanoven předpoklad, že enkodér se během chodu přehřívá, a to způsobuje, že přestane fungovat, jakmile dosáhne kritické teploty. Byl proto na přehřívavý čip enkodéru připevněn žebrovaný chladič, který by mohl čipu ulevit. Chladič ale neměl žádný pozorovatelný vliv na přehřívání enkodéru. Ani při hledání odpovědi na otázku, proč by se měl čip přehřívát, nebyly nalezeny žádné podobné případy. Enkodér byl shledán jako vadný kus z výroby a byl proto objednan nový.

6.2.2. QGroundControl

Druhou aplikací, která byla použita, byl QGroundControl, vyvinutý v rámci projektu Dronecode Project. Jedná se také o open-source aplikaci, která je na rozdíl od Mission Planneru dostupná i na platformách OS X, Linux, iOS a Android, a navíc poskytuje možnost zařízení plně dálkově ovládat. Právě možnost dálkového ovládání byla důležitá, protože po ztrátě možnosti ovládat plavidlo dálkovým ovladačem, byl vývoj zařízení zastaven do chvíle, než dorazí zásilka s novým enkodérem.[65]

Řídící jednotka byla připojena k aplikaci stejným způsobem jako u programu Mission Planner a byla provedena počáteční inicializace a kalibrace senzorů jako v předchozím případě. Dále byla jednotka odpojena od počítače a zapojena samostatně s rádiovou anténou pro komunikaci a přenos telemetrických dat a s šesticí motorů, tak jako by vše bylo upevněno na plavidle ve výsledné podobě. Druhá rádiová anténa byla připojena k PC přes simulovaný sériový port. Do elektrického obvodu pohonu plavidla byla zapojena baterie a aktivovaný Pixhawk byl přes rádio připojen k PC, kde byl aktivován „letový“ mód.

Je důležité říct, že motory byly zapojené, ale žádný z nich neměl nasazenou vrtuli. To by totiž při testování pohonu mohlo způsobit vážné problémy i újmu na zdraví, kdyby testování přineslo neočekávané komplikace.

Aktivování letového módu však proběhlo podle představ. Všechny motory začaly běžet na minimální otáčky a byla vyzkoušena i jejich reakce na zrychlení otáček.

6.2.3. PX4 Autopilot

Testováním ve zmíněných aplikacích se podařilo ověřit, že všechny komponenty pohonu fungují. V dalším kroku bylo třeba pohon nastavit tak, aby systém věděl, které motory mají v konkrétním okamžiku být aktivní a s jakou intenzitou, aby bylo možné s plavidlem směrově manipulovat. A i přes širokou škálu funkcí a nastavitelných parametrů, které aplikace umožňují měnit, však obě postrádaly jednu, která pro konkrétní případ pohonu našeho plavidla byla klíčová. Aplikace sice umožňovaly měnit parametry motorů, nikoliv však jednotlivě, ale pouze u všech motorů najednou, což bylo neslučitelné s naším konceptem.

Takový problém by byl řešitelný pouze celkovým sestrojením vlastní kostry plavidla a individuálním nastavením celého PX4 Autopilot open-source kódu, který Pixhawk podporuje a na kterém zmíněné aplikace pracují. Jelikož kód je open-source, dá se k němu

dostat skrze platformu GitHub, na které také probíhá velká část modifikací a diskusí spojených s vývojem autonomních prostředků využívajících firmware PX4. Avšak komplexita a časová náročnost takového úkolu již byla neslučitelná s požadovaným termínem odevzdání této práce, a proto otázka doladění pohonu zůstává otevřená.

7. Závěr

Tato diplomová práce se věnovala vývoji konstrukce plavidla, pro batymetrické mapování. Protože v současnosti již batymetrická zařízení existují, bylo cílem přinést nadhled či novou perspektivu na řešenou problematiku, která by eventuálně pomohla rozvoji tohoto oboru od nezaujaté osoby.

Postupně zde byly detailně popsány jednotlivé kroky vývoje s důrazem na problematické aspekty postupu při tvorbě plavidla. Vývoj byl velmi náročný, obzvláště kvůli absenci jakékoliv předchozí zkušenosti se stavbou plavidel a problematikou dálkově ovládaných prostředků. Komplikace přinesla potřeba konkrétních elektronických komponentů, které, byť jsou běžně dostupné, jsou často dováženy ze zahraničí a prodlevy v pokroku při práci pak přinesly hlavně dlouhé dodací lhůty. Tytéž komplikace byly s spojeny s dodatečným objednáváním PPM enkodéru, který byl prvotně zaslán vadný a defacto nefunkční. Další problémy přinesly souvislosti spojené s aplikací, skrze kterou mělo být plavidlo uvedeno do pohybu. Přes její otevřenost, je její primární použití příliš konkretizované pouze na nejběžnější využití.

Během vývoje se podařilo sestrojít plavidlo zamýšlené konstrukce, které je schopné plavby (byť ne aktivní) s šesticí motorů, které odpovídají na ovládání dálkového ovladače. Plavidlo bylo úspěšně testováno v prostorách katedry hydrotechniky Fakulty stavební, aby se přesvědčilo o jeho plavbyschopnosti.

Úspěšně byl zkompileován software, který během plavby za použití GNSS přijímače, IMU jednotky a sonaru zaznamenává všechny potřebné údaje k úspěšnému a georeferencovatelnému batymetrickému mapování.

Celková teoretická cena rekonstrukce takového plavidla by byla přibližně 32 300 Kč. Skutečné náklady na konstrukci byly necelých 18 000 Kč, protože mnoho komponentů na stavbu poskytla katedra geomatiky. Pro srovnání, cena jednoduchých batymetrických plavidel začíná na 80 000 Kč, tím pádem se podařilo sestrojít plavidlo s relativně nízkým rozpočtem.[69]

I přes to, že se nepodařilo dosáhnout kompletní funkčnosti, zbývá nyní jen velmi málo k tomu, aby se plavidlo podařilo správně zprovoznit a nechat plavidlo mapovat bez použití dálkového ovládání, pouze pomocí předem naplánované trasy např. v softwaru Mission Planner.

8. Zdroje

- [1] Vyměřovací loď Valentýna II., [online], Povodí Vltavy, státní podnik ©2013 [cit. 22. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vymerovaci-lode/valentyna>.
- [2] Batymetrický LiDAR Sensor Leica HawkEye-5, [online], Leica Geosystems AG ©2023 [cit. 22. 4. 2023]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/bathymetric-lidar-sensors/leica-hawkeye-5>.
- [3] D. Vodička, Šířka trupu, nebo foil?, [online], Lodní noviny ©2023 [cit. 23. 4. 2023]. Dostupné z: <https://lodninoviny.cz/Cruising/sirka-trupu-nebo-foil>.
- [4] B. Chadima, Studie typů pohonů plavidel, [online], [cit. 23. 4. 2023]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291993.pdf>.
- [5] M. Beneš, Airboat jezdí po ledě i souši. Vodní záchranáři ho testovali na Lipně, [online], [cit. 23. 4. 2023]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ceske-budejovice/zpravy/zachranari-testovali-na-lipne-airboat.A160201_2222472_budejovice-zpravy_mbe.
- [6] Wikipedia contributors, Dr Graham Bell's Ugly duckling, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Ugly_Duckling.jpg.
- [7] Wikipedia contributors, Airboat [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Airboat>.
- [8] Wikipedia contributors, British Army's airboat 1915, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Glisser_automobile_de_1%27arm%C3%A9e_anglaise_en_M%C3%A9sopotamie.jpg.
- [9] Fusion 360, aplikace společnosti Autodesk, Inc. © 2023 [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>.
- [10] Photoshop, aplikace společnosti Autodesk, Inc. © 2023 [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://www.adobe.com/cz/products/photoshop/landpb.html?gclid=Cj0KCQjw4NujBhC5ARIsAF4Iv6eCr9HYdrYGVMclIi8cUXE6E-dQIKu5ifAJ-oOScr94ifng8Nwaz1IaAjVSEALw_wcB&skwcid=AL!3085!3!341239342490!e!!g!!photoshop&mv=search&ssid=LZ32SYVR&ef_id=Cj0KCQjw4NujBhC5ARIsAF4Iv6eCr9HYdrYGVMclIi8cUXE6E-dQIKu5ifAJ-oOScr94ifng8Nwaz1IaAjVSEALw_wcB:G:s&s_kwcid=AL!3085!3!341239342490!e!!g!!photo-shop!1473548090!59990199787&gad=1.
- [11] Michael Christou (a.k.a. wersy), Impeller Boat RC - spiral vase printable 3D model, [online]. [cit. 1. 8. 2022]. Dostupné z: https://www.thingiverse.com/thing:274054?fbclid=IwAR3fhO15sIqoPoHotOu5I6LSbrHXZn2U0_Q5tfwPkerDU6SWzW6Bn-9WwIk.
- [12] Guoji Xu, Yuanjie Jin, Shihao Xue, Peng Yuan, Jinsheng Wang, Hydrodynamic shape optimization of an auxiliary structure proposed for circular bridge pier based on a developed adaptive surrogate model, [online]. [cit. 21. 2. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822012112>.

- [13] HRISHIKESHAVAN, Vikram; BLACK, James; CHOPRA, Inderjit. Development of a quad shrouded rotor micro air vehicle and performance evaluation in edgewise flow. In: Proceedings of the American Helicopter Society Forum. 2012, [online]. [cit. 23. 4. 2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Vikram-Hrishikeshavan/publication/280841394_Development_of_a_Quad_Shrouded_Rotor_Micro_Air_Vehicle_and_Performance_Evaluation_in_Edgewise_Flow/links/55c925a208aea2d9bdc9261b/Development-of-a-Quad-Shrouded-Rotor-Micro-Air-Vehicle-and-Performance-Evaluation-in-Edgewise-Flow.pdf.
- [14] Fatbear666, Simple EDF 50mm ducted fan 3D model, [online]. [cit. 18. 2. 2023]. Dostupné z: <https://cults3d.com/en/3d-model/game/simple-edf-50mm>.
- [15] Pixhawk overview, [online], ArduPilot Dev Team © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html>.
- [16] Computer Vision and Geometry Lab of ETH Zurich, [online], © CVG, ETH Zürich, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://cvg.ethz.ch/>.
- [17] ARM Cortex-M4, [online], Arm Limited © 1995-2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://developer.arm.com/documentation/100166/0001/Functional-Description/Processor-features?lang=en>.
- [18] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, [online], InvenSense © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/motion-inertial/imu/data_sheet/mpu-6000-datasheet1.pdf.
- [19] ST Micro 16-bit gyroscope L3GD20H, [online], STMicroelectronics © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/929243/STMICROELECTRONICS/L3GD20H.html>.
- [20] ST Micro 14-bit accelerometer/compass (magnetometer) LSM303DLHC, [online], STMicroelectronics © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm303dlhc.html>.
- [21] Barometr MEAS MS5611-01BA03, [online], TE Connectivity Ltd. family of companies © 2015, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5611-01BA03%7FB3%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5611-01BA03_B3.pdf%7FMS561101BA03-00.
- [22] Fotografie hieroglyfů Seneferovi hrobky, [online], G. Dagli Orti © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://heartheboatsing.com/2018/03/02/the-ancient-egyptian-rowing-stroke-propelling-the-boats-of-gods-and-men/>.
- [23] 32-bit STM32F103 failsafe Co-processor, [online], STMicroelectronics © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c6.html>.
- [24] M8N GPS 8N external compass for Pixhawk 2.4.8, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/33054561368.html?spm=a2g0o.productlist.main.27.37f870ac6fdMFY&algo_pvid=c92b50b3-3784-4edd-9274-f963c81b0a00&algo_exp_id=c92b50b3-3784-4edd-9274-f963c81b0a00-

[13&pdp_npi=3%40dis%21USD%2148.06%2135.08%21%21%21%21%21%402102188b16849196122638956d073f%2112000018871618115%21sea%21CZ%214176259691&curPageLogUId=Q4enjEnklw83](https://www.drawio.com/?pdp_npi=3%40dis%21USD%2148.06%2135.08%21%21%21%21%21%402102188b16849196122638956d073f%2112000018871618115%21sea%21CZ%214176259691&curPageLogUId=Q4enjEnklw83).

- [25] PPM Encoder, [online], ArduPilot Dev Team © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-ppm-encoder.html>.
- [26] Wikipedia contributors, Pulse-width modulation, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation.
- [27] Wikipedia contributors, Pulse-position modulation, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-position_modulation.
- [28] PPM Encoder User Manual V1, [online], 3D Robotics, Inc. © 2014, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://download.ardupilot.org/downloads/wiki/pdf_guides/PPM-Encoder-V3-Manual.pdf.
- [29] Buzzer (aka Tone Alarm), [online], ArduPilot Dev Team © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-buzzer.html>.
- [30] Common Power Module, [online], ArduPilot Dev Team © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-3dr-power-module.html>.
- [31] Holybro Telemetry Radio, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://docs.px4.io/main/en/telemetry/holybro_sik_radio.html.
- [32] Matek PDB-XT60 s 5V, 12V, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://www.rotorama.cz/prislusenstvi/matek-pdb-s-5v-12v?gclid=CjwKCAjw67ajBhAVEiwA2g_jEE30tvN_D4W4ZEAGLYY9I5JH8Wp_exXUochIrLmNZ0rf7CDQIJJbHxoCV3IQAvD_BwE.
- [33] Futaba R617FS, [online], Futaba corporation © 2008, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://futabausa.com/wp-content/uploads/2018/09/R617FS.pdf>.
- [34] Wikipedia contributors, Outrunner, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Outrunner>.
- [35] Outrunnerový motor A2212/13T - Bezkartáčový, 1000 kV, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1633-1000-kv-motor-outrunnerovy-bezkartacovy-a2212-13t.html?gclid=CjwKCAjw67ajBhAVEiwA2g_jElcjEjfjHC4_UrMv_erbGdmG7JnFb8Bsu50qm4Lyic0KuTggse54yixoCynwQAvD_BwE.
- [36] Wikipedia contributors, Electronic speed control, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_speed_control.
- [37] Wikipedia contributors, RS-232, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232#RTS,_CTS,_and_RTR.
- [38] Telemetry / Serial Port Setup, [online], ArduPilot Dev Team © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-telemetry-port-setup.html#set-up-through-the-ground-station>.
- [39] Wikipedia contributors, I²C, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>.
- [40] Open source technology stack for building diagramming applications draw.io, [online], JGraph Ltd © 2005 – 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.drawio.com/>.

- [41] Raspberry Pi 4 Computer Model B, [online], © Raspberry Pi Ltd 2023, [cit. 18. 5. 2023].
Dostupné z: https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf?_gl=1*4g0c8v*_ga*MTU4ODc3MTc4MC4xNjg1NTI3Nzg1*_ga_22FD70LWDS*MTY4NTUyNzc4NC4xLjAuMTY4NTUyNzc4NC4wLjAuMA.
- [42] Wikipedia contributors, Bluetooth Low Energy, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy.
- [43] Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM, [online], RPishop.cz © 2023, [cit. 31. 5. 2023].
Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-4/1599-raspberry-pi-4-model-b-2gb-ram-765756931175.html>.
- [44] An overview of Windows 10 IoT Core, [online], © Microsoft 2023, [cit. 31. 5. 2023].
Dostupné z: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/iot-core/windows-iot-core>.
- [45] MPU6050, [online], LaskaKit © 2023, [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-gyroskop-a-akcelerometr-gy-521--mpu6050/>.
- [46] ANT2B-SUR, [online], © 2023 ArduSimple, [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.ardusimple.com/product/survey-gnss-multiband-antenna/>.
- [47] SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout – ZED-F9P (Qwiic), [online], [cit. 31. 5. 2023].
Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/16481>.
- [48] Pixhawk 2.4.8, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [49] GPS M8Nmodule 8M compass, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [50] PPM encoder, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [51] Buzzer, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [52] 3DR power module, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [53] 3DR Radio V5 Telemetry 433Mhz, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [54] ESC BLHeli 30A, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/>.
- [55] Tattu 10000mAh LiPo, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/taa10k3s15e5-gens-ace-lipo-tattu-serie-3s-10000-mah-15c>.
- [56] Tattu 8000mAh LiPo, [online], [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.peckamodel.cz/taa80003s15e5-gens-ace-lipo-tattu-serie-3s-8000-mah-15c>.
- [57] SCCS Hydrographic Solution, [online], © 2023 SCCS Survey, [cit. 31. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.sccssurvey.co.uk/pdfs/Hydrographic/SCCS-Hydrographic-Solution.pdf>.
- [58] Yenkee YPB 1180 RD, [online], <https://www.czc.cz/yenkee-powerbanka-ypb-1180-rd-10000mah-pd-18w-cervena/330559/produkt>.
- [59] Sonar AIRMAR Smart sensor, [online], © Airmar Technology Corporation, [cit. 31. 5. 2023].
Dostupné z: <https://www.airmar.com/uploads/brochures/dt800.pdf>.
- [60] Mission Planner, [online], ArduPilot Dev Team © 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>.
- [61] USB Seriál port driver, [online], © Driver Scape 2023, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.driverscape.com/download/usb-serial-port>.

- [62] Wikipedia contributors, Servomotor, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Servomotor>.
- [63] Wikipedia contributors, Bezkartáčový stejnosměrný motor, [online], [cit. 18. 5. 2023].
Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Bezkart%C3%A1%C4%8Dov%C3%BD_stejnosm%C4%9Brn%C3%BD_motor.
- [64] QGroundControl, [online], © 2019 Dronecode Project, Inc., [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
<http://qgroundcontrol.com/>.
- [65] GitHub, [online], © 2023 GitHub, Inc., [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
<https://github.com/PX4/PX4-Autopilot>.
- [66] Python, [online], ©2001-2023. Python Software Foundation, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
<https://www.python.org/>.
- [67] RealVNC, [online], © 2002-2023 RealVNC, [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
<https://www.realvnc.com/en/a/>.
- [68] Baterie Panasonic LC-R3P, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
https://www.digikey.cz/cs/products/detail/panasonic-bsg/LC-R121R3P/46252?utm_adgroup=Battery%20Products&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Dynamic%20Search_CZ_Czech%20Republic_Product&utm_term=&utm_content=Battery%20Products&gad=1&gclid=CjwKCAjwyuejBhA5EiwA5WD7_dPa1r-IcKSIvydbVMmQEonNxAkAs8F1QA9dOFBg0ge_cJR1YmruXRoCojEQAvD_BwE.
- [69] Bathymetry boat, [online], [cit. 18. 5. 2023]. Dostupné z:
<https://www.alibaba.com/showroom/unmanned-bathymetry-boat.html>.
- [70] Ing. Štěpán Hodík, Vývoj nízkonákladového GNSS zařízení, [online], [cit. 18. 5. 2023].
Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/83537>

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Malba v Seneferově hrobce[22]	10
Obrázek 2: Alexander Graham Bell na lodi Ugly Duckling[6]	11
Obrázek 3: Airboat britského námořnictva 1915[8]	11
Obrázek 4: Volně dostupný model plavidla[11].....	13
Obrázek 5: Upravený model plavidla[9].....	14
Obrázek 6: Model pravého vedlejšího trupu[9].....	15
Obrázek 7: Upravený model krytu motoru[9].....	17
Obrázek 8: Upravený model vrtule[9].....	17
Obrázek 9: Pixhawk 2.4.8 [10].....	18
Obrázek 10: GNSS přijímač s kompasem [10].....	22
Obrázek 11: PPM Encoder [10]	22
Obrázek 12: Buzzer [10]	23
Obrázek 13: Analogový napájecí modul [10]	23
Obrázek 14: Radiokomunikace [10]	24
Obrázek 15: Power distribution board [32]	25
Obrázek 16: Přijímač rádiového signálu [10]	26
Obrázek 17: Outrunnerový motor [35]	26
Obrázek 18: Regulátor otáček [10]	27
Obrázek 19: Raspberry Pi 4 model B [10]	29
Obrázek 20: MPU6050 [10].....	29
Obrázek 21: ANT2B-SUR [10]	30
Obrázek 22: SparkFun GPS-RTK-SMA Breakout – ZED-F9P (Qwiic) [10]	31
Obrázek 23: Sonar	31
Obrázek 24: Powerbanka Yankee	32
Obrázek 25: Baterie Panasonic [10].....	33
Obrázek 26: Vytištěný hlavní trup plavidla [10].....	34
Obrázek 27: Schéma zapuštění závitových vložek [10].....	35
Obrázek 28: Závitová vložka M5 [10].....	35
Obrázek 29: Zapuštěný závit [10].....	36
Obrázek 30: Zkrácená závitová tyč [10]	36
Obrázek 31: Mosazná vsuvka 3/4“ [10]	37
Obrázek 32: Vsuvka zapuštěná do trupu [10].....	37
Obrázek 33: Hlavní trup s těsněním [10]	38

Obrázek 34: Kryt hlavního trupu [10].....	38
Obrázek 35: Spoj vedlejšího trupu [10].....	39
Obrázek 36: Spojený vedlejší trup [10]	39
Obrázek 37: Vnitřní hrana před a po zahlázení [10]	40
Obrázek 38: Použití tmelu na trupy [10]	41
Obrázek 39: Otvory v těsnění [10]	42
Obrázek 40: Způsob těsnění šikmého krytu [10]	43
Obrázek 41: Prasklina trupu [10]	43
Obrázek 42: Nový model krytu vedlejšího trupu[9].....	44
Obrázek 43: Mosazný nátrubek 3/4“ [10].....	45
Obrázek 44: Nátrubky se zářžkovým kroužkem [10].....	46
Obrázek 45: Trubky se zářžkovým kroužkem [10]	46
Obrázek 46: Schéma rozložení motorů [40].....	47
Obrázek 47: Broušením upravený kryt motoru [10]	48
Obrázek 48: Připevněný kryt s usazeným motorem [10].....	49
Obrázek 49: Zapojení GNSS [10]	51
Obrázek 50: Zapojení PPM enkodér – Pixhawk [10]	52
Obrázek 51: Zapojení PPM enkodér – rádio anténa [10].....	52
Obrázek 52: Zapojení napájecího modulu [10]	53
Obrázek 53: Zapojení PDB [10]	54
Obrázek 54: Zapojený regulátor otáček [10]	54
Obrázek 55: Výstup signálu z Pixhawk do regulátoru otáček [10]	55
Obrázek 56: Zapojení regulátoru otáček do motoru [10]	55
Obrázek 57: Zapojení Rádía [10]	56
Obrázek 58: Diagram zapojení pohonu[40]	56
Obrázek 59: Napájení Raspberry Pi4 B [10]	57
Obrázek 60: Zapojení IMU [10]	58
Obrázek 61: Zapojení GNSS přijímače [10]	58
Obrázek 62: Zapojení u-blox – GNSS anténa [10]	59
Obrázek 63: Zapojení sonar – Raspberry [10].....	59
Obrázek 64: Diagram zapojení měřících přístrojů.....	60
Obrázek 65: Připojení antény GNSS na plavidle[10]	60
Obrázek 66: Výběr kostry prostředku	63
Obrázek 67: Kalibrace akcelerometru.....	63
Obrázek 68: Kalibrace kompasů.....	64

Obrázek 69: Aktivní GNSS RTK připojení	64
Obrázek 70: Poloha zařízení s aktivním RTK připojením	65
Obrázek 71: Kalibrace dálkového ovladače	66

10. Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry procesoru 32bit ARM Cortex-M4 core s FPU.....	19
Tabulka 2: Parametry 32-bit STM32F103 failsafe Co-procesoru	19
Tabulka 3: Parametry akcelerometru[18].....	20
Tabulka 4: Parametry gyroskopu[18].....	20
Tabulka 5: Parametry gyroskopu	20
Tabulka 6: Parametry akcelerometru	20
Tabulka 7: Parametry kompasu	21
Tabulka 8: Parametry barometru.....	21
Tabulka 9: Parametry GNSS přijímače	21
Tabulka 10: Parametry Rádía	24
Tabulka 11: Parametry PBD	25
Tabulka 12: Parametry rádio přijímače.....	25
Tabulka 13: Parametry baterie 1 [55]	27
Tabulka 14: Parametry baterie 2 [56]	27
Tabulka 15: Parametry Raspberry Pi 4 model B [41]	28
Tabulka 16: Parametry MPU6050[18].....	29
Tabulka 17: Parametry antény ANT2B-SUR [46].....	30
Tabulka 18: Parametry GNSS přijímače [47]	30
Tabulka 19: Technické parametry sonaru [59]	31
Tabulka 20: Parametry powerbanky Yankee	32
Tabulka 21: Parametry baterie Panasonic	32
Tabulka 22: Ceny použitých elektronických komponentů	33
Tabulka 23: Ceny použitých komponentů.....	49
Tabulka 24: GPS Port – rozložení pinů[15].....	50
Tabulka 25: I2C – rozložení pinů[15].....	51
Tabulka 26: Analogový napájecí modul – rozložení pinů[15]	53
Tabulka 27: Rádio – rozložení pinů[15].....	55
Tabulka 28: IMU jednotka – rozložení pinů	57

11. Seznam příloh

Elektronická příloha

Příloha 1: Aplikace SonarBoat obsahuje následující soubory:

- 1) SonarBoat (.py)
- 2) sync_hour (.py)
- 3) kill_port (.py)
- 4) sonar (.py)
- 5) imu (.py)

Příloha 2: Model plavidla obsahuje následující soubory:

- 1) Čepele (.stl)
- 2) Hlavní trup (.stl)
- 3) Kryt motoru (.stl)
- 4) Kryt vedlejšího trupu 1 (.stl)
- 5) Kryt vedlejšího trupu 2 (.stl)
- 6) Vedlejší trup 1 (.stl)
- 7) Vedlejší trup 2 (.stl)