

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

VÝVOJ A TESTOVÁNÍ ROV INSPEKČNÍ / OBSERVAČNÍ TŘÍDY (Micro ROV)

**Jakub Filip, David Theodor Nimrichtr
Pardubický kraj**

Pardubice 2023

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

VÝVOJ A TESTOVÁNÍ ROV INSPEKČNÍ / OBSERVAČNÍ TŘÍDY (Micro ROV)

DEVELOPMENT AND TESTING OF INSPECTION / OBSERVATION-CLASS ROV (Micro ROV)

Autoři: Jakub Filip, David Theodor Nimrichtr

Škola: SPŠE a VOŠ Pardubice, Karla IV 13, 530 02 Pardubice

Gymnázium, Pardubice, Dašická 1083, 530 03 Pardubice

TECHNECIUM – Talent centrum Průmyslu 4.0, Nádražní 641, 533 51
Pardubice

Kraj: Pardubický kraj

Konzultanti:

Mgr. Alexandr Prokop (Technecium)

Bc. Karel Čtvrtečka (Technecium)

Ing. Alois Blažek (JHV Engineering)

RNDr. Kateřina Nováková, PhD. (Recetox)

prof. RNDr. Ivan Čepička, Ph.D. (PřF UK Praha)

prof. RNDr. Adam Petrusek, Ph.D. (PřF UK Praha)

Mgr. Jan Mařík, Ph.D. (ARUP AV ČR)

Mgr. Petr Brož, Ph.D. (IG AV ČR)

Prof. RNDr. Zdeněk Ďuriš, CSc. (OSU)

Mgr. Jan Dolanský (VČM Pardubice)

Pardubice 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsme svou práci SOČ vypracovali samostatně a použili jsme pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Pardubicích 15.5. 2023

Jakub Filip

V Pardubicích 15.5. 2023

David Theodor Nimrichtr

Poděkování

Rádi bychom poděkovali za několikaleté odborné vedení naší práce Mgr. Alexandru Prokopovi z talentcentra Technecium, i za zprostředkování konzultací s vědeckými pracovníky vysokých škol a AV ČR, kteří pomohli formulovat specifikace vyvíjeného ROV. Dále bychom chtěli poděkovat talentcentru Technecium a JHV Engineering za zajištění technického a materiálního zázemí, bez kterého by náš projekt nemohl být realizován.

Anotace

Tato práce se zabývá vývojem a testováním robotické ponorky kategorie Micro ROV (Remotely Operated Vehicle) pro aplikace v ochraně přírody, hydrobiologii, hydrogeologii, podvodní archeologii atp. Klíčovými vlastnostmi vyvíjeného ROV je cenová dostupnost, nízké provozní nároky, robustnost a vysoká konfigurovatelnost pro různé typy aplikací pomocí přídavných modulů – odběrová zařízení, manipulátory, měřicí zařízení a senzory. Dosaženými parametry se vyvíjené ROV blíží komerčně dostupným modelům střední třídy za zlomek jejich pořizovací ceny, což, jak věříme, napomůže jeho širokému rozšíření, například v oblasti monitorování a ochrany ohrožených vodních biotopů.

Klíčová slova

ROV; robotická ponorka; podvodní průzkum; hydrobiologie; hydrogeologie; podvodní archeologie;

Annotation

This thesis deals with the development and testing of a robotic Micro ROV (Remotely Operated Vehicle) for applications in conservation, hydrobiology, hydrogeology, underwater archaeology, etc. The key features of the developed ROV are affordability, low operational requirements, robustness and high configurability for different types of missions using additional modules – sampling devices, manipulators, measuring devices and sensors. The performance achieved brings the ROV close to commercially available mid-range models for a fraction of their purchase price, which we believe will facilitate its widespread application, for example in the monitoring and protection of endangered aquatic habitats.

Keywords

ROV; robotic submarine; underwater exploration; hydrobiology; hydrogeology; underwater archaeology;

Obsah

Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Anotace	6
Klíčová slova	6
Annotation.....	6
Keywords	6
Obsah	7
Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek	8
Seznam zkratk	9
Kapitola 1 – Úvod.....	9
1.1 – Motivace.....	9
1.2 – Historie.....	10
1.3 – ROV inspekční / observační třídy	12
1.4 – Kategorie současných ROV dle výkonu a užití	13
1.5 – Přehled stávajících systémů Mikro ROV a jejich vlastností	18
1.6 – Možnosti konstrukce nízkonákladového Mikro ROV	19
1.7 – Záměry a cíle projektu	19
Kapitola 2 – Systémová úroveň	20
2.1 – Přehled systémů	21
2.2 – Systémové požadavky	22
2.3 – Funkční analýza ROV	22
Kapitola 3 – Subsystémy ROV	23
3.1 – Plováky.....	23
3.2 – Rám	24
3.3 – Vodotěsný obal	25
3.4 – Napájení	28
3.5 – Motorizace.....	30
3.6 – Trustery	30
3.7 – Kamerový systém.....	32
3.8 – Osvětlení	33
3.9 – Komunikace	35
3.9.1 – Požadavky	35
3.10 – Řídící jednotka	37
3.11 – Senzory.....	39
3.12 – Řídící stanice operátora.....	39
3.13 – Odběrová zařízení	41
Kapitola 4 – Integrace systému, testy a výsledky.	43
4.1 – Integrace.....	43
4.2 – Testy a výsledky	44
4.3 – Testovací ponory	47
Kapitola 5 – Shrnutí projektu a závěr	48
5.1 – Shrnutí průběhu a výsledků.....	48
5.2 – Navázané spolupráce.....	49
5.3 – Plány do budoucna	49
5.4 – Závěr	49
Přehled použitých zdrojů	49

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení ponorek	11
Obr. 2: Schéma uspořádání typického observačního / inspekčního ROV	13
Obr. 3: Vliv polohy centra vztlaku a těžiště na stabilitu	14
Obr. 4: Nejčastější uspořádání thrusterů zajišťující manévrování ROV	15
Obr. 5: Zvýšení ovladatelnosti kolem vertikální osy pomocí vyklonění thrusterů od podélné osy ROV	15
Obr. 6: Vliv délky ROV na jeho směrovou stabilitu	16
Obr. 7: Vliv vzdálenosti trysek na stabilitu ROV	16
Obr. 8: Vliv směru otáčení motorů na podélnou stabilitu ROV	16
Obr. 9: Systémové schéma pracovního nasazení běžného ROV	20
Obr. 10: Blokové schéma zapojení ROV, část komunikace a řízení	21
Obr. 11: Blokové schéma zapojení ROV, část nabíjení baterie a napájení	21
Obr. 12: Vykreslení modelu uspořádání našeho ROV Knowtilus v 3D programu	23
Obr. 13: Současná průchodka pro ROV V1.1	28
Obr. 14: Nový battery pack 3S 60Ah využívající články LiIon 18650	29
Obr. 15: Prototyp trusteru používaný na V1.0	32
Obr. 16: Současně používaný truster	32
Obr. 17: průsvitnost v jednotlivých vlnových délkách	33
Obr. 18: Prototyp světel, u něhož došlo k tečení špatně vytvrzené zalévací epoxidové hmoty	34
Obr. 19: Současně používaný prototyp světel	35
Obr. 20: Živý přenos kamery z řídicího počítače	37
Obr. 21: porovnání velikosti Pine64 v popředí, Raspberry Pi Zero a Raspberry Pi 3B	38
Obr. 22: Současné PCB – návrh (vlevo) a výsledek (vpravo)	39
Obr. 23: GUI ovládací obrazovky ROV	41
Obr. 24: Nasávací odběrové zařízení	42
Obr. 25: Prototyp odběrového zařízení na filtraci planktonu	43
Obr. 26: ROV V1.1	44
Obr. 27: Testování v požární nádrži	44
Obr. 28: Testování na expedici v Chorvatsku	45
Obr. 29: Testování v zatopeném lomu Leštinka (přímo po krajském kole SOČ)	46

Seznam tabulek

Tab. 1: Aplikace ROV	10
Tab. 2: Komerčně prodávaná ROV (zdroj: aniwaa.com)	18
Tab. 3: Systémové požadavky	22
Tab. 4: Možnosti konstrukce plováků	24
Tab. 5: Materiály na výrobu a výplň pontonů	24
Tab. 6: Materiály na výrobu rámu pro ROV	25
Tab. 7: Možnosti řešení tlakového trupu	26
Tab. 8: Materiály pro tlakový trup	26
Tab. 9: Tabulka použitých hliníkových slitin (alupa.cz)	27
Tab. 10: Možnosti napájení	29
Tab. 11: Možnosti motorizace	30
Tab. 12: Možnosti ESC	30
Tab. 13: Možnosti thrusterů	31
Tab. 14: Námi testované thrustery	31

Tab. 15: Vyzkoušené kamery	33
Tab. 16: Sériové komunikační protokoly	35
Tab. 17: Možnosti pro řídicí počítač	38
Tab. 18: Testovací ponory	47
Tab. 19: Provedené testy během testovacích ponorů	47
Tab. 20: Přehled vyvíjených a postupně realizovaných vylepšení verze V1.1 na verzi V1.2.	48

Seznam zkratk

ROV	Remotely Operated (Underwater) Vehicle	Dálkově ovládané (podvodní) vozidlo
PWM	Pulse Width Modulation	Pulzně šířková modulace
HDPE	High Density PolyEthylen	Polyethylen s vysokou hustotou
PVC	Polyvinyl chloride	Polyvinylchlorid
STM32		Mikroprocesor společnosti STMicroelectronics
RPi		Jednodeskový počítač společnosti Raspberry Pi
ESC	Electronic Speed Controller	Elektrický kontrolér rychlosti
SBC	Single Board Computer	Jednodeskový počítač
DIY	Do-It-Yourself	Udělej si sám
AUV	Autonomous Underwater Vehicle	Autonomní podvodní vozidlo
UUV	Unmanned Underwater Vehicle	Bezpilotní podvodní vozidlo
DVL	Doppler Velocity Logger	Přístroj na měření rychlosti pomocí dopplerova jevu
USBL	Ultra Short Base Line	System sloužící k přesnému určení polohy.
sonar	SOund Navigation And Ranging	Určování polohy a vzdálenosti na principu odraženého zvuku
GUI	Graphical User Interface	Grafické uživatelské rozhraní

Kapitola 1 – Úvod

1.1 – Motivace

Oceány pokrývají 71 % zemského povrchu (Hawaii Pacific University Oceanic Institute). Určují klimatické podmínky, využívají se k dopravě, poskytují stanoviště pro velkou část života na Zemi, jsou zdrojem potravy pro velkou část světové populace a v neposlední řadě také zdrojem energie, kterou můžeme využívat. Navzdory jejich významu bylo prozkoumáno pouze 5 % povrchu světových oceánů (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Obdobná situace panuje také v případě sladkovodních ekosystémů, jak povrchových (potoků, řek, rybníků, zatopených lomů, jezer, rašelinišť), tak i podzemních (zvodních a podzemních řek). Vodní

ekosystémy jsou v současnosti nejvíce člověkem ovlivněným typem ekosystémů a jejich společenstva patří k nejzranitelnějším¹.

Tento relativní nedostatek dat týkající se celé řady vodních ekosystémů, je mimo jiné způsoben chybějícími (cenově dostupnými) technologiemi dálkového environmentálního průzkumu, jakými jsou právě dálkově řízená podvodní plavidla (Remotely Operated Vehicle, dále ROV). ROV lze použít k nahrazení potápěčů v podmínkách, které jsou pro jejich působení příliš nebezpečné nebo technicky obtížné. Sběr dat nebo jiné úkoly pod vodou mohou být vykonávány s mnohem vyšší efektivitou díky možnosti 24/7 operace s živým přenosem videa a dalších vědeckých údajů, které jsou průběžně ukládány.

1.2 – Historie

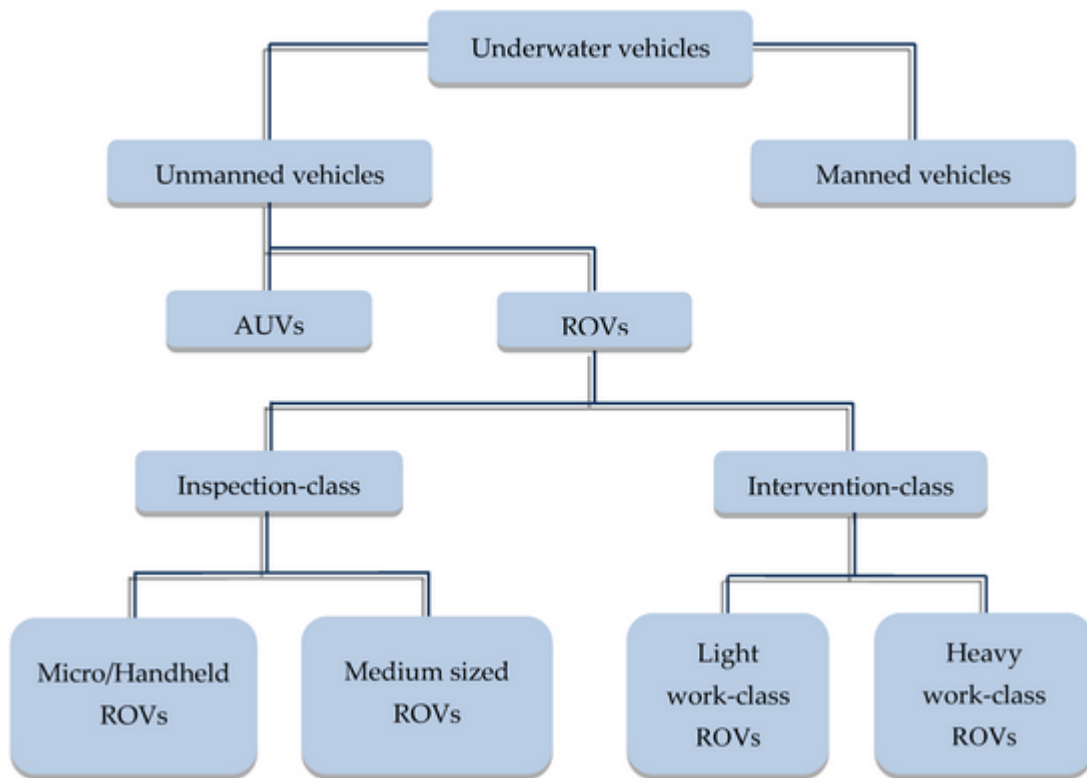
V druhé polovině 20. století byla technologie ROV široce rozvíjena pro vojenské účely a pro průmysl těžby ropy a zemního plynu z mořského dna. Vzhledem k technologickému pokroku v posledních třech desetiletích dochází k rozšíření využívání ROV i do dalších oblastí. Níže uvedený výčet nepředstavuje ani zdaleka kompletní seznam všech jejich aktuálních aplikací.

Tab. 1: Aplikace ROV

Odvětví	Aplikace ROV
Energetika – větrné elektrárny, těžba ropy a plyn, vodní elektrárny	Vizuální inspekce, řídicí zásahy
Armáda a bezpečnostní sektor	Inspekce, záchranné operace, hydrografie
Oceánografie a vědy o moři	Pozorování korálů a mořského života a sběr sedimentů
Vnitrozemská vodní infrastruktura (nádrže, přehrady, a kanály)	Inspekce, čištění
Technické potápění a záchrana/vyzvedávání potopených lodí	Záchrana osob a majetku, transport
Nakládání s jaderným odpadem	Kontrola vodních okruhů jaderných zařízení
Podvodní výzkum	Podvodní archeologie, geologie, biologie

Vedle klasických ROV, která jsou připojena k uživateli / operátorovi kabelem, který slouží vedle přenosu dat a řízení také jako poutací lano, se v posledních letech díky rozvoji technologií umělé inteligence (AI) začínají objevovat také zcela volně plovoucí autonomní podvodní plavidla (Autonomous Underwater Vehicle, AUV). Obě skupiny se proto někdy společně označují jako UUV (Unmanned Underwater Vehicle). Členění UUV ukazuje níže uvedený obrázek.

¹, Fytoplankton a zooplankton, fyto-bentos a zoobentos, makrofytocenózy a ichtyocenózy. Již zřídka nalezneme jejich přirozené druhové složení. Většina druhů vázaných na vodu patří zpravidla mezi ohrožené druhy. V České republice bylo v roce 2005 z celkového počtu 61 druhů ryb a kruhoústých chráněno podle zákona 19 druhů (31 %) a z celkového počtu 21 obojživelníků bylo chráněno 20 druhů (95 %). Druhy vodních živočichů jako například rak kamenáč nebo perlorodka říční již vymizely z 90 % původních lokalit. (poradme.se,2023)



Obr. 1: Rozdělení ponorek (zdroj: *Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review*)

Problematika AUV je natolik široká a specifická, že si zasluhuje samostatný popis přesahující rámec této práce, a proto se dále bude věnovat jen tématům spojeným s ROV.

První podskupinou jsou intervenční / pracovní ROV, využívaná zejména v odvětví námořního strojírenství s drtivou většinou aplikací v pobřežním ropném a plynárenském průmyslu. Tuto skupinu lze rozdělit na lehké a těžké modely pracovní třídy. V první třídě jsou obvykle plně elektrická ROV o hmotnosti 100–1500 kg, která mohou pracovat v hloubkách až 3000 m, a která jsou v mnoha případech vybavená manipulátory umožňujícími vykonávat práce jako čištění, vrtání atp. Jsou také vhodné pro průzkumné (mapovací) operace s použitím přesných navigačních přístrojů. Ve druhé skupině jsou pak robustní stroje s hmotností až 5000 kg. Jejich pohon a pohyb manipulátory je zajišťován obvykle hydraulicky ovládanými systémy. Tyto systémy mohou být provozovány v hloubkách až 6000 m a díky hydraulickému řízení jsou schopny vykonávat i náročnější práce (výstavbu/opravy základů vrtných plošin atp.).

Vzhledem ke své velikosti a složitosti mají tyto ROV vysoké pořizovací a provozní náklady a vyžadují ke svému provozu rozsáhlou infrastrukturu/zázemí.

Pro mnoho aplikací nejsou takto velká ROV efektivní a v těchto případech se proto používají spíše plavidla inspekční / observační třídy.

1.3 – ROV inspekční / observační třídy

Tato ROV mají obvykle menší rozměry a hmotnost než intervenční ROV a lze je rozdělit na dvě skupiny:

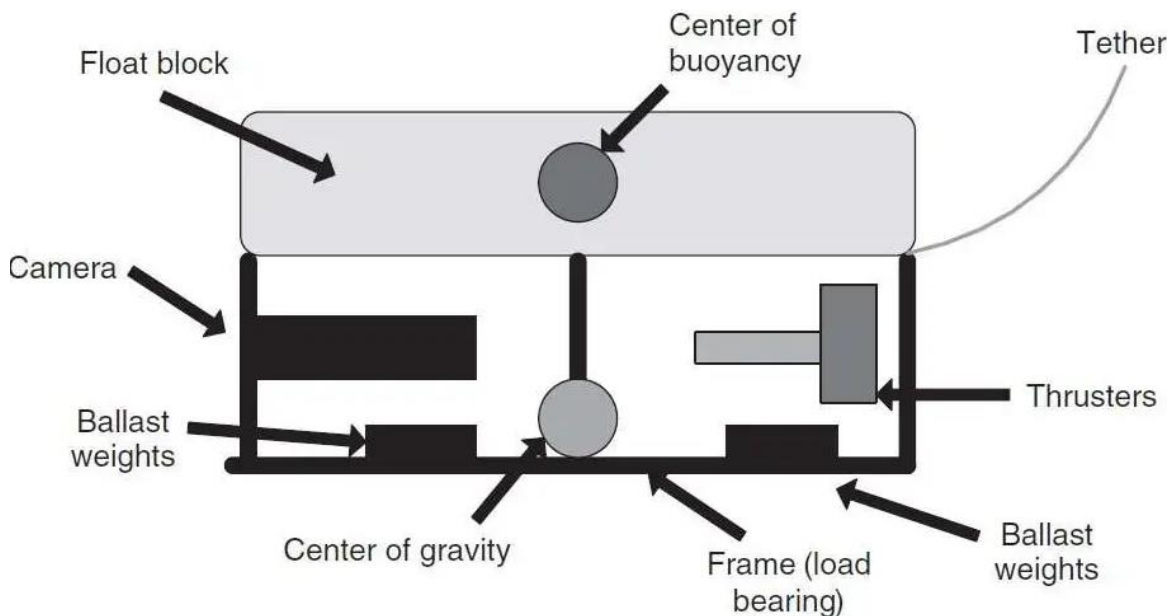
- středně velké inspekční ROV
- mikro ROV

Středně velká inspekční ROV váží většinou mezi 30 a 120 kg, takže je lze spouštět a vytahovat z vody i bez speciálního zařízení. ROV v této kategorii mají často tzv. otevřený rám, který umožňuje montáž dalších senzorů a také malých nástrojů. Kromě inspekční činnosti pomocí kamerového systému mohou některá z těchto ROV provádět také drobné operace s náradím jako je čištění, fixace nebo vytahování předmětů. Středně velká observační ROV slouží jako nosiče přesných navigačních a zobrazovacích systémů s vysokým rozlišením pro podvodní průzkum a mapování včetně 3D sonarů pro navigaci a vyhledávání v kalných vodách. Konfigurace s otevřeným rámem obvykle činí tato ROV stabilnější platformou, což je důležité pro přesné sonarové průzkumy. Středně velká ROV jsou obvykle napájena stejnosměrným zdrojem s napětím až 600 VDC (Ocean Modules V8) a výkonem až 6 kW (Lighthouse ROV Perseo, DWTEK Remotely Operated Vehicle). Napájení a komunikace pro tato ROV je přenášena prostřednictvím kabelů s měděným jádrem nebo kombinací měděného napájecího a optického komunikačního kabelu. Tato ROV často používají výkonné motory s velkou rezervou tahu, což jim umožňuje operovat i v obtížných podmínkách (velký proud, přetížení atp.).

Mezi tzv. mikro ROV řadíme stroje vážící mezi 3 a 20 kg. Mezi jejich výhody patří nízké pořizovací a provozní náklady, snadná manipulace (nevyžadují speciální vypouštěcí zařízení a naviják jako větší modely). Existuje v širokém spektru konfigurací včetně hydrodynamicky tvarovaných. Stabilita těchto plavidel bývá nižší než u inspekčními ROV střední velikosti s otevřeným rámem, což je často právě důsledkem jejich tvaru. Používají zdroje s nižším napětím s menšími požadavky na výkon, obvykle 300–2000 W (AC-CESS AC-ROV 100, Outland Technology ROV 1000 Model). Napájení a komunikace u těchto ROV probíhá nejčastěji kabelem s měděným jádrem. Použití optického vlákna je kvůli vysokým nákladům poměrně vzácné. Vzhledem k jejich malému vnitřnímu objemu pro baterie mají pohonné jednotky používané u mikro ROV podstatně menší tah ve srovnání se středně velkými ROV. Nicméně vzhledem k jejich malé hmotnosti je u nich poměr tahu k hmotnosti stále poměrně vysoký. Aplikace této třídy ROV spočívá téměř výhradně v inspekčních / observačních operacích. Výjimečně mohou být tyto ROV vybaveny i malými manipulátory na lehké materiály. Tato ROV nejsou příliš vhodná k mapování v důsledku méně přesné navigace a jejich schopnost nést přídatná zařízení je s ohledem na jejich nízkou rezervu výkonu omezená. Maximální hloubka ponoru se u této kategorie ROV běžně pohybuje kolem 100 m kvůli požadavkům na nízkou hmotnost, nízké výrobní náklady a dobrou přenositelnost celého systému. Tlakové těleso má obvykle jednoduchou konstrukci a není plněné olejem atp. V případě mikro ROV tvoří kabel významný příspěvek k hydrodynamickému odporu celého plavidla. Snahu o použití vodičů s minimální průřezovou plochou však zároveň limituje maximální délka kabelu, kterou lze v závislosti na požadavcích napájení použít.

1.4 – Kategorie současných ROV dle výkonu a užití

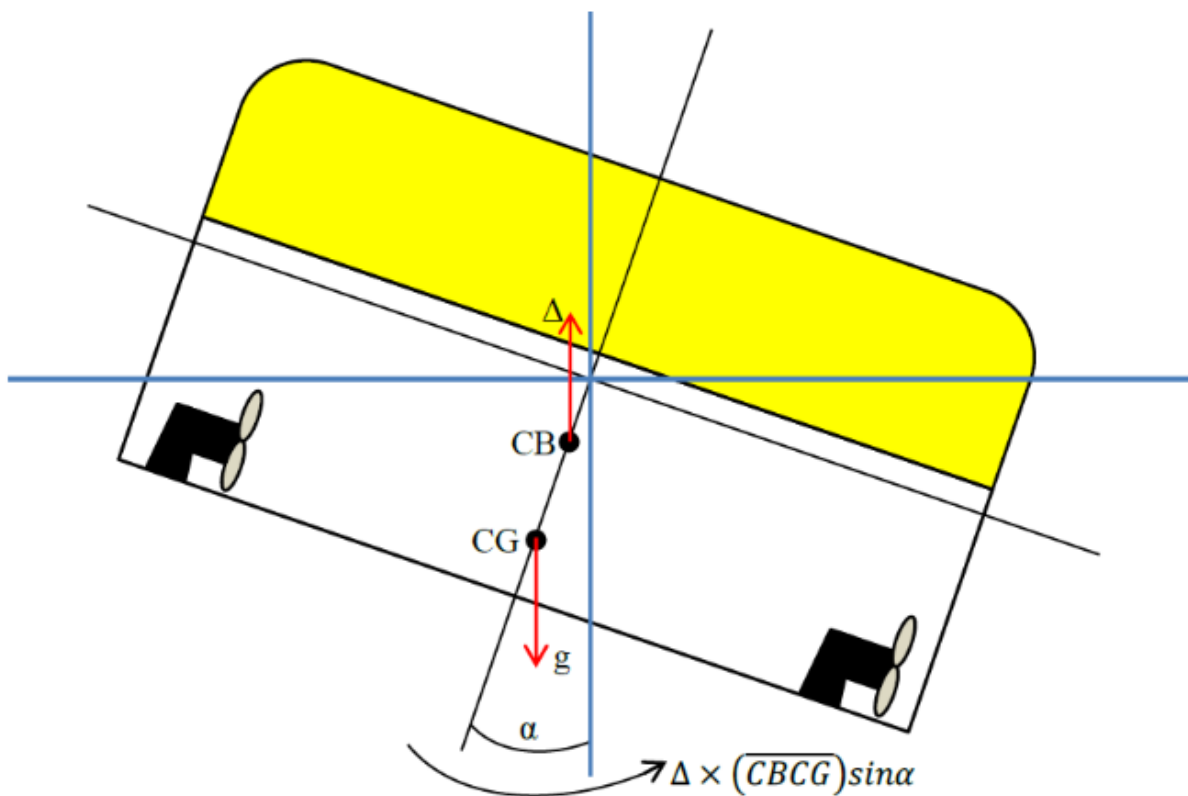
1.4.1 – Design a vlastnosti ROV



Obr. 2: Schéma uspořádání typického observačního / inspekčního ROV

Vztlak a stabilita

Z hydrostatického pohledu jsou ROV (na rozdíl od AUV) obvykle koncipována tak, aby měla v celém rozsahu operačních hloubek, neutrální vztlak a ke stoupání, resp. klesání využívala pouze dynamického tahu motorů – thrusterů. Pozitivní složku vztlaku zajišťují plováky, které jsou vyrobeny z lehkého nestlačitelného materiálu. V případě ROV určených do menších hloubek (<250 m) se jedná nejčastěji o tvrdé PUR pěny, jejichž výhodou je dobrá stálost, snadné zpracování a variabilita (z hlediska požadovaného tvaru plováku), dalšími používanými materiály je pak pěnové PVC, PIR nebo různé kopolymery umožňující operovat i v hloubkách kolem 1 km. Pro extrémní hloubky je však třeba použít odolnější materiály. V případě historické mise D. Walshe a J. Piccarda na dno Mariánského příkopu (1960) byli použity na batyskafu Trieste plováky vyplněné lehkým benzínem. Moderní ROV (i výzkumné ponorky s lidskou posádkou) používají sofistikované „kompozity“ kombinující tvrdé polymery s dutými skleněnými nebo keramickými (mikro)sférami.



Obr. 3: Vliv polohy centra vztlaku a těžiště na stabilitu (zdroj: *Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review*)

Plováky a jejich umístění má velký vliv také z hlediska stability, respektive dynamiky ROV.

Klíčovým parametrem je tu vzájemná poloha působišť vztlaku (CB) a těžiště (CG), přičemž pro pozitivní stabilitu, kdy má plavidlo po naklonění přirozenou tendenci se vracet do horizontální polohy (osa ROV zpět do vertikály), je nezbytné, aby se CB nacházelo nad CG jak ilustruje výše obrázek 3.

Většina velkých intervenčních ROV a také inspekčních ROV střední třídy, která jsou určena pro práce pod vodou (vrtání, čištění, manipulace s většími objekty) vyžaduje vysokou míru hydrodynamické stability. Z tohoto pohledu je preferována větší vertikální separace mezi CB a CG a z toho vyplývající větší rameno síly, které působí proti směru náklonu. Výhodou takového uspořádání je také zjednodušené ovládání plavidla. U menších observačních a Mikro ROV obvykle zcela odpadá potřeba SW asistence řízení. Daní za to je však menší dynamická obratnost ROV, která sebou může přinášet jistá omezení z hlediska jeho použití (vyžadující složité 3D manévry – např. ve vracích, jeskyních atp.), zvýšené požadavky na pracovní rozsah manipulátorů, počet kamer atp.

Vysoce obratná (multilaterální) ROV, u nichž se polohy CB a CG de facto překrývají, se nejčastěji vyskytují u Mikro ROV, určených pro hobby nebo observační účely, kde je vysoká obratnost výhodou také z hlediska snímání kamerou. V souvislosti s rozvojem inteligentních asistenčních algoritmů řízení se v poslední 5 letech začínají objevovat podobná řešení i ve střední třídě observačních a/nebo inspekčních pracovních ROV.

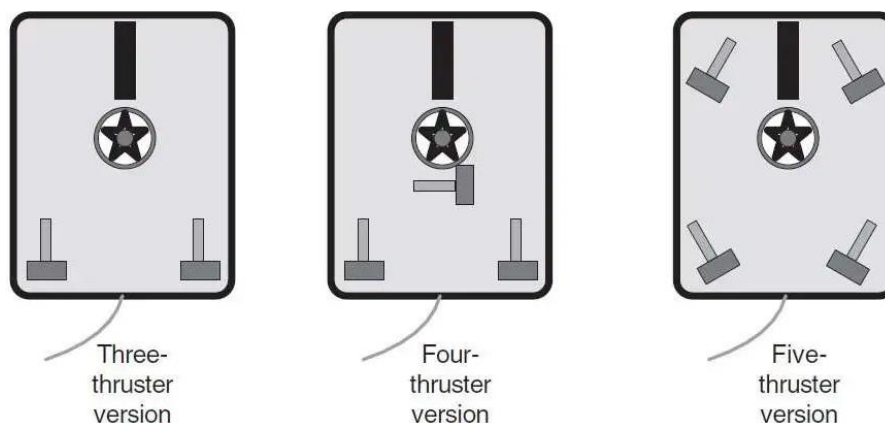
Uspořádání pohonných jednotek (thrusterů)

Dalším klíčovým parametrem ovlivňujícím obratnost a dynamiku ROV je umístění pohonných jednotek. Pohonný systém ROV se obvykle skládá ze tří nebo více trusterů umístěných tak, aby

momentové rameno jejich síly vzhledem k CB dávalo ROV náležitou manévrovatelnost a ovladatelnost ve všech 3 osách.

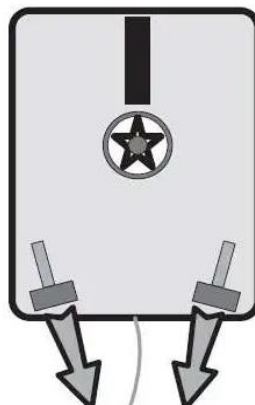
Manévrování ROV probíhá pomocí vektorování tahu pohonných jednotek (trysek). Míra asymetrického tahu závisí na umístění a výkonu pohonné jednotky. Existuje celá řada možností umístění trysek, které umožňují různou míru manévrovatelnosti.

Uspořádání tří pohonných jednotek (trysek) umožňuje pohyb pouze vzhůru/dolů, vpřed/vzad a otáčení v horizontálním směru. Čtvrtá pohonná jednotka umožňuje také boční posun. Variace pěti trysek umožňuje všem čtyřem horizontálním tryskám tah v libovolném horizontálním směru současně.



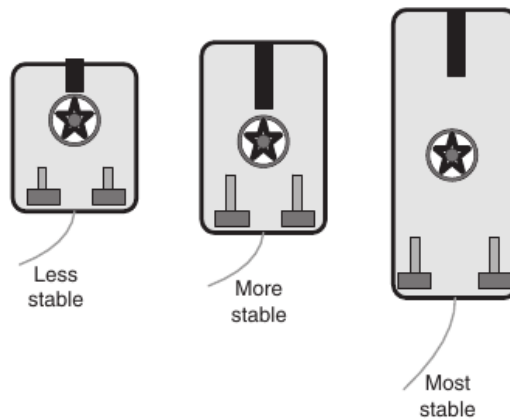
Obr. 4: Nejčastější uspořádání thrusterů zajišťující manévrování ROV (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 51)

Další možností je odklonění trysek od podélné osy vozidla (viz obrázek 5), které zlepšuje moment otáčení kolem vertikální osy, a přitom poskytuje ROV stále velmi dobrou podélnou stabilitu.

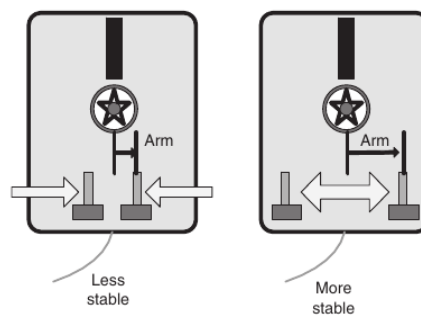


Obr. 5: Zvýšení ovladatelnosti kolem vertikální osy pomocí vyklonění thrusterů od podélné osy ROV (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 51)

Dalším parametrem, který ovlivňuje zejména dynamickou stabilitu ROV je vzdálenost motorů od těžiště v podélném a příčném směru.

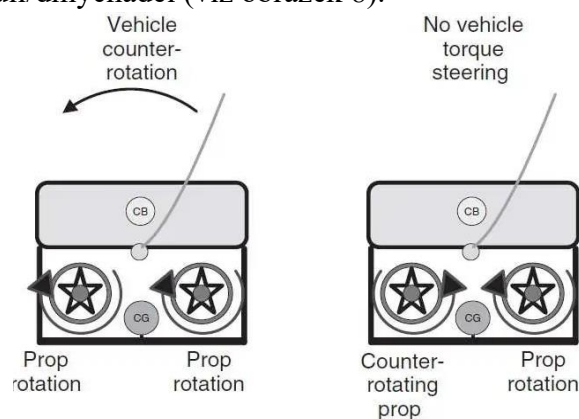


Obr. 6: Vliv délky ROV na jeho směrovou stabilitu (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 26)



Obr. 7: Vliv vzdálenosti trysek na stabilitu ROV (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 26)

Jedním z problémů s více pohonnými jednotkami bez protiběžných vrtulí je problém vzniku točivého momentu. U dvou nebo více pohonných jednotek pracujících ve stejné rovině pohybu se stejným smyslem otáčení vrtulí bude výsledkem tendence ROV ke stáčení se směru opačném k smyslu otáčení lodních vrtulí/dmychadel (viz obrázek 8).



Obr. 8: Vliv směru otáčení motorů na podélnou stabilitu ROV (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 52)

1.4.2 – Elektronika ROV, způsoby komunikace, senzory, mechatronické manipulátory

Kamery

Kamery ROV jsou primárním způsobem, jak může operátor ovládat ROV a sledovat, co se děje. Větší ROV zejména v kategorii pracovní třídy je vybavena větším počtem kamer. Některá ROV jsou vybavena podvodními kamerami na mechanickém rameni, které jim dovoluje obsáhnout široké zorné pole.

Světla

Světla se obvykle umisťují na několika místech ROV tak, aby dobře osvětlovala zorná pole kamer a pracovní prostor pro manipulátory. Větší množství světel zároveň vytváří potřebnou redundanci pro případ, že dojde k jejich poškození.

Zdroj energie

Existují dva hlavní způsoby napájení ROV z palubních baterií nebo z hladiny. Napájení z hladiny znamená, že energie je dodávána z horního plavidla nebo kontrolní stanice. To má tu výhodu, že vozidlo nemusí vozit těžké baterie a také není omezeno výdrží baterie. Na druhou stranu musí mít horní napájecí zdroj bezpečnostní opatření na ochranu mořského života pro případ narušení izolace napájecího kabelu. Pokud to výdrž baterie dovolí, ROV napájené bateriemi mohou být výhodné pro rutinní kontroly díky jejich nenáročnosti na pozemní infrastrukturu.

Řídící stanice operátora

Prostředky pro ovládání ROV mohou mít řadu podob v závislosti na jeho velikosti, od velmi malých ručních ovladačů a uživatelského rozhraní o velikosti chytrého telefonu po velín s více monitory a ručními ovladači. U větších ROV jsou často i dva operátoři, jeden ovládá ROV a druhý pak manipulační ramena nebo jiné nástroje.

Komunikační kabel

Kabel spojující ROV s řídicí stanicí operátora zajišťuje komunikaci, případně i napájení. Tento kabel je buď složen z měděných kroucených párů, nebo optických vláken.

Pomocná vedení

Aby bylo možné připojit externí zařízení, mají některá ROV externí konektory poskytující napájení a komunikační sběrnice.

Přídavné vybavení

Sonar

Při operacích za nízké viditelnosti způsobené rozvířenými sedimenty nebo nízkou intenzitou okolního světla může být vizuální orientace pomocí kamer neúčinná a ROV místo nich využívá sonar. k vytvoření obrazu prostředí, aby umožnil navigaci a identifikaci i v těchto podmínkách.

Dopplerův záznamník rychlosti (DVL, Doppler Velocity Logger)

Dopplerův záznam rychlosti (DVL) využívá dopplerův jev, k vypočítu přibližné rychlosti ROV vzhledem k mořskému dnu. Spolu s informací o kurzu umožňuje sledovat polohu ROV vodou.

USBL

Některá ROV využívají systém USBL (z anglického Ultrashort Baseline), který umožňuje stanovit polohu ROV vzhledem k externímu referenčnímu majáku (obvykle na mořském dně nebo na hladinovém plavidle).

Drápáky, manipulátory a jiné nářadí

Manipulátory, drápáky a jiné nářadí dovoluje ROV vykonávat další činnosti než pouhé pozorování. Manipulační ramena se mohou pohybovat od malých drápáků o velikosti desítek cm až po velké manipulátory s dosahem přes 2 m a zdvihem 200 kg. Pokročilejší manipulátory lze použít k provádění velmi složitých úkolů, jako je otáčení ventilů, vázání uzlů nebo umístování přístrojů a nástrojů do přesných pozic.

1.5 – Přehled stávajících systémů Mikro ROV a jejich vlastností

Tab. 2: Komerčně prodávaná ROV (zdroj: aniwaa.com)

Komerční drony s kamerou	Výdrž baterie	Pracovní hloubka	4K CAM	Manipulátor	Kabel / RC řízení	PRICE
Chasing Dory	60 min	15 m	Ne	Ne	Kabel	\$499
Chasing F1	360 min	28 m	Ne	Ne	RC	\$699
Geneinno Poseidon	300 min	100 m	Ne	Ne	Kabel	\$910
PowerVision PowerRay	240 min	30 m	Ano	Ne	Kabel	\$999
Chasing Gladius Mini	120 min	100 m	Ano	Ne	Kabel	\$1,099
YouCan BW Space Pro	300 min	100 m	Ano	Ne	Kabel	\$1,399
QYSEA FIFISH V6	270 min	100 m	Ano	Ne	Kabel	\$1,699
Aquarobotman Nemo	180 min	100 m	Ano	Ne	Kabel	\$1,799
ThorRobotics TrenchRover	120 min	30 m	Ano	Ano	Kabel	\$1,878
Geneinno T1	240 min	150 m	Ano	Ne	Kabel	\$2,499
Chasing M2 PRO	300 min	150 m	Ano	Ne	Kabel	\$4,999
Notilo Plus	60 min	60 m	Ano	Ne	Kabel	\$4,499
DTG3 ROV	480 min	200 m	Ano	Ne	Kabel	\$7,186
PIONEER	120 min	150 m	Ano	Ne	Kabel	\$9,878
DRAGONFISH 200H	240 min	100-300 m	Ano	Ano	Kabel	\$10,388
SeaOtter-2	neomezený	150 m	Ano	Ne	Kabel	\$20,995
FIFISH PRO W6	480 min	350 m	Ano	Ano	Kabel	\$32,800
Revolution ROV	480 min	305 m	Ano	Ano	Kabel	10000 - 50000\$

1.6 – Možnosti konstrukce nízkonákladového Mikro ROV

Rostoucí možnosti a dostupnost 3D modelování, 3D tisku a CNC obrábění, spolu s dostupností relativně levných a zároveň dostatečně robustních klíčových komponent ROV – jako jsou BLDC motory pro vodní trysky, vysoko kapacitní LiIon/LiPo baterie, mikrokontrolery a jedno deskové počítače, CCTV kamery případně další senzory – dovolují seriózně pomýšlet nad realizací i tak komplexních konstrukčních projektů jako je ROV principu DIY tj. na úrovni jednotlivce – technologického kutila – nebo komunity bez rozsáhlé podpůrné infrastruktury výzkumného nebo průmyslového charakteru. V posledních cca 10-ti letech bylo v zahraničí úspěšně realizováno několik projektů zaměřených na konstrukci nízkonákladového Mikro ROV jako například Proteus: Mini underwater remotely operated vehicle (J.Guerra,2014).

Kromě odborných publikací jsou zdrojem velmi cenných informací, týkajících se různých praktických aspektů designu a konstrukce dílčích komponent ROV, také online fóra a DIY komunity.

1.7 – Záměry a cíle projektu

Cílem tohoto projektu bylo navrhnout a postavit levný, snadno ovladatelný, přenosný, bezpečný a spolehlivý ROV pro malé hloubky (<300m), s některými vlastnostmi a univerzálností profesionálních ROV střední třídy schopný, jak nasazení pro vědecký výzkum na odborných pracovištích, tak provozování studenty a veřejností, jež by umožnilo významně rozšířit možnosti jejich participace na výzkumu a ochraně vodních ekosystémů a jejich společenstev, která patří mezi člověkem nejvíce ovlivněným a nejzranitelnějším.

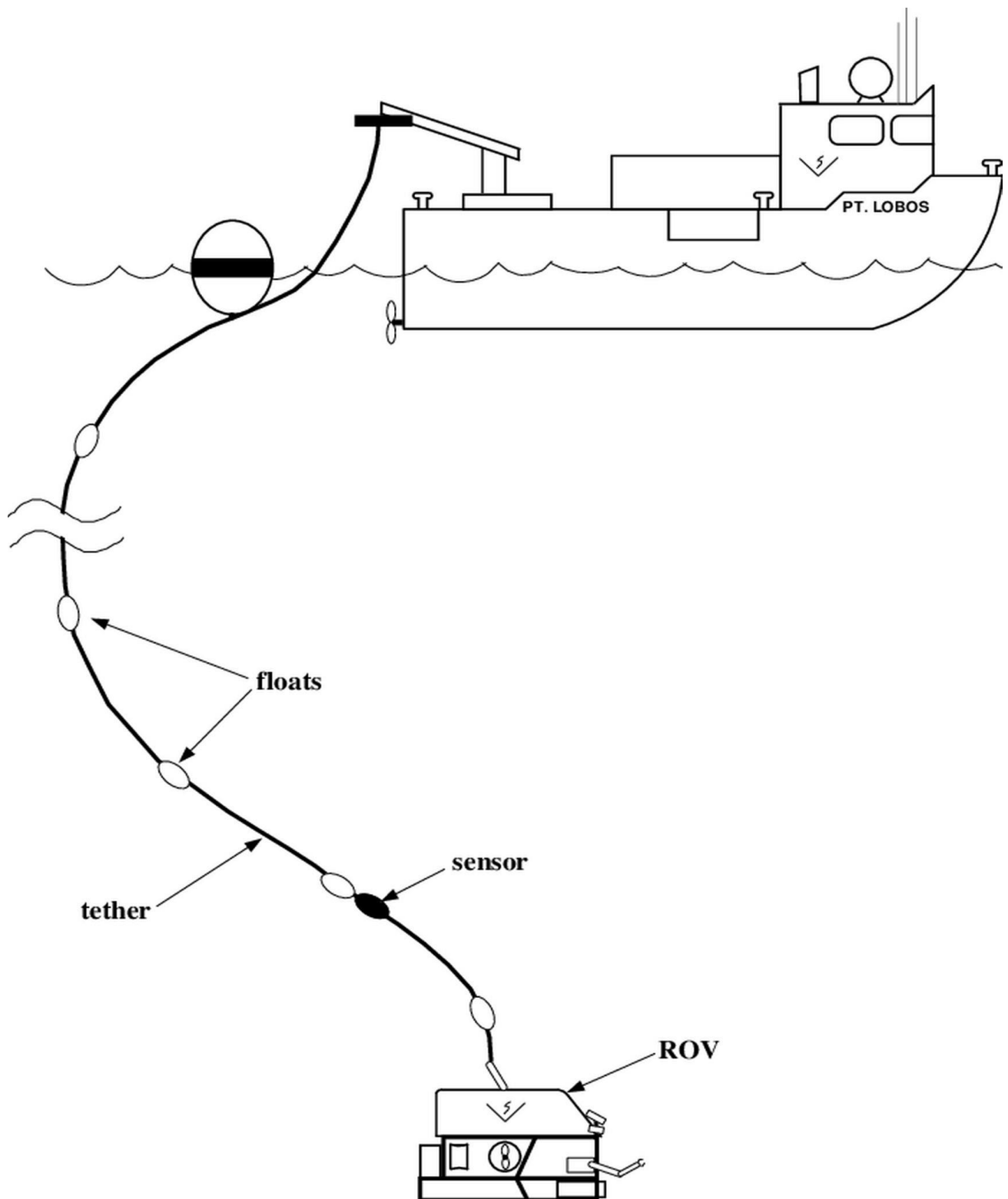
V rámci projektu byl proveden průzkum mezi potenciálními i zkušenými uživateli a obsáhla rešerše literatury z oboru (*), abychom definovaly koncepční a konstrukční požadavky na naše ROV. Vyvinuli jsme několik náčrtů možných návrhů pro naše ROV a postavili technologický demonstrátor V1.0.

Demonstrátor byl úspěšně testován v rámci hydrobiologické expedice k Jaderskému moři v roce 2019. Testy potvrdily správnost zvolené koncepce ROV. Během testů V1.0 dosáhl maximální hloubky 17 metrů, a posílal živé vysílání z kamery do řídicí stanice operátora. Maximální dosažená rychlost V1.0 byla 3 uzly. Motory nicméně z důvodu vibrací neběžely na plný výkon.

ROV je dále vyvíjena k využití pro výuku v Techneciu i vzdělávací, výzkumné a ochranné účely ve spolupráci s odbornými pracovišti VŠ, AV ČR a dalšími partnery.

(* v rámci naší rešerše, se nám nepodařilo identifikovat v ČR pracoviště, která by se systematicky podobnému výzkumu a vývoji ROV věnovala, z tohoto důvodu usilujeme o rozvoj zahraniční spolupráce, konkrétně s mladým týmem na univerzitě v polské Gdyni)

Kapitola 2 – Systémová úroveň



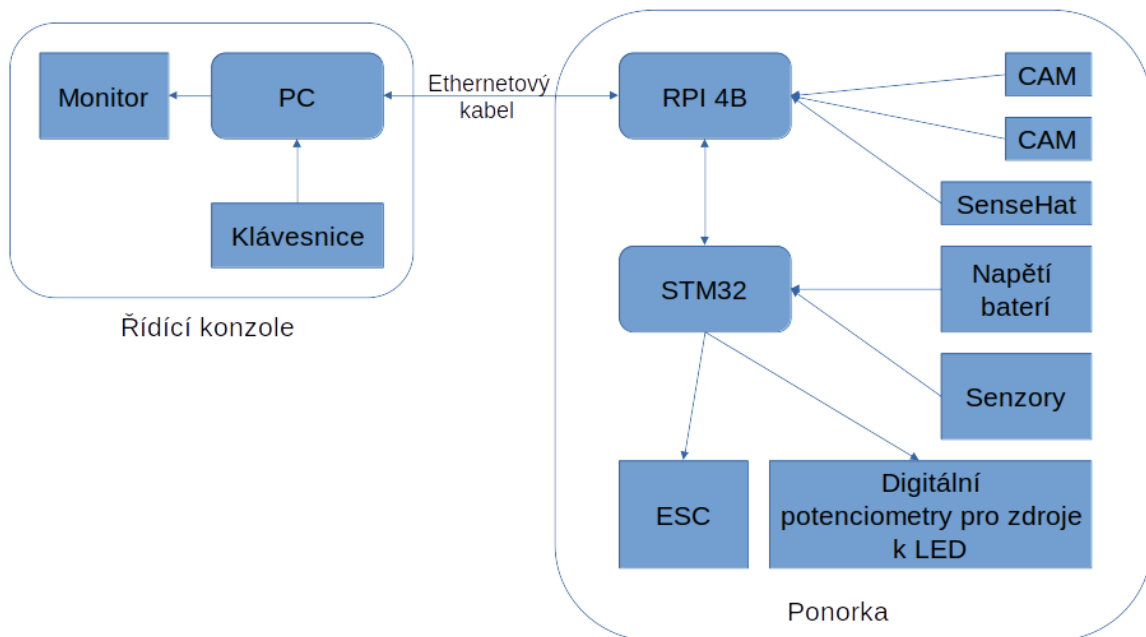
Obr. 9: Systémové schéma pracovního nasazení běžného ROV (převzato z: researchgate.net)

2.1 – Přehled systémů

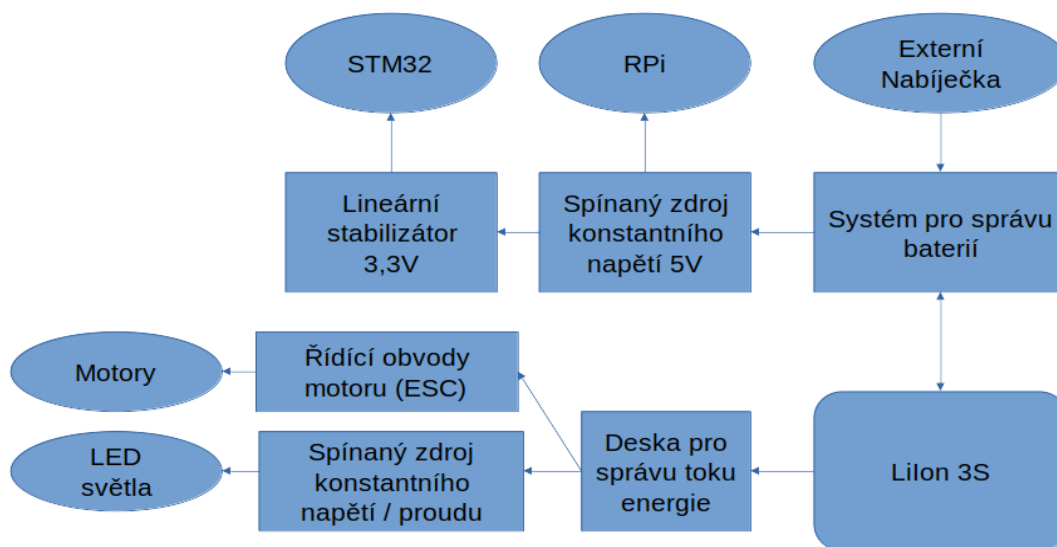
Naše ROV se skládá z několika částí. Základně si můžeme rozdělit na mechanickou a elektronickou. Do mechanické části patří vztlaková tělesa, rám, na který se vše uchytlí, vodotěsná gondola pro elektroniku a trustery zajišťující pohyb.

Z elektronické části zde máme napájení, motory, světla, komunikace, řídicí jednotka, kamery a senzory

2.1.1 – Blokové schéma zapojení elektroniky



Obr. 10: Blokové schéma zapojení ROV, část komunikace a řízení



Obr. 11: Blokové schéma zapojení ROV, část nabíjení baterie a napájení

2.2 – Systémové požadavky

Vzhledem k výše uvedené motivaci spojené výzkumem, monitorování a ochrannou vodních ekosystémů jsme oslovili primárně odborníky v následujících oblastech:

- Hydrobiologie (prof. RNDr. Ivan Čepička, Ph.D. PřF UK, prof. RNDr. Adam Petrušek Ph.D. PřF UK, Prof. RNDr. Zdeněk Ďuriš, CSc. OsU)
- Ekotoxikologie (RNDr. Kateřina Nováková Ph.D. Recetox)
- Archeologie (Mgr. Jan Mařík Ph.D. ARUP AV ČR)
- Ochrana a monitorování přírody (Mgr. Jan Dolanský, VČM Pardubice)
- Hydrogeologie (Mgr. Petr Brož, Ph.D. IG AV ČR)

Výsledkem těchto konzultací jsou níže uvedené systémové požadavky (Tab. 3) a návrh odběrových zařízení (sekce 3.13).

Tab. 3: Systémové požadavky

Popis	Základ	cíl
Cena	< 24000 Kč	
Rozměry	Celé ROV se vejde do kufru osobního automobilu (800, 600, 600 mm)	
Hmotnost	< 12kg	~ 15 kg
Osoby potřebné k obsluze	2 osoby	
Hloubka	> 100m	300m
Výdrž baterie	> 3h	> 5h
Vztlak zařízení	mírně pozitivní	neutrální
Komunikace	přenos obrazu a ovládacích pokynů	nízké zpoždění přenosu <50ms
Kamera	Živý přenos	kontrola zoomu a ostření
Senzory	Hloubka, teplota, IMU	vodivost, turbidita
Čas příprav	10min	5min
Ovládání	Jednoduché, robustní	
Použité komponenty	Dobře dostupné	
Uchycení modulů a plováků	Flexibilní	
Výrobní náročnost	Jednoduchá	
Použití	Hydrobiologie, hydrogeologie, podvodní archeologie	

2.3 – Funkční analýza ROV

Naše ROV je rozděleno do následujících hlavních částí:

- Plováky
- Rám
- Takový trup
- Řídící jednotka
- Komunikace
- Pohon
- Napájení

- Světla a kamery
- Senzory a odběrová zařízení

Konstrukční uspořádání našeho ROV Knowtilus ukazuje obrázek 12.



Obr. 12: Vykreslení modelu uspořádání našeho ROV Knowtilus v 3D programu

Kapitola 3 – Subsystemy ROV

3.1 – Plováky

Plováky využíváme k dosažení vztahové síly potřebné pro neutrální vztlak ROV.

3.1.1 – Požadavky

Po plovácích požadujeme nízkou hmotnost vzhledem k objemu, přijatelnou cenu, kontrolu nad kvalitou výrobku. Dále požadujeme neměnnost vztlaku vzhledem k působícímu tlaku v mezích, pro které jsou navrženy

3.1.2 – Možnosti

Hledáme materiál, který je lehčí než voda. V historii se k tomuto účelu hojně využívalo dřevo. Dřevo je však nasákové a z tohoto důvodu se nám nehodí.

Pro naše účely dostupné materiály:

Tab. 4: Možnosti konstrukce plováků

	Syntetická pěna	CBD potápěčské křídlo	Pontony
Plusy	Nestlačitelná	Možnost měnit vztlak	
	může být použita na konstrukci	účinné využití energie	
Mínusy	nutnost utěsnit proti nasáknutí vodou	může se roztrhnout přefouknutím	Nelze začlenit do konstrukce
		potřeba systému pro kontrolu vztlaku	

Tab. 5: Materiály na výrobu a výplň pontonů

	Materiály na pontony			Materiály pro výplň pontonů		
	Hliník	HDPE	PVC	Pěna	Minerální olej	Vzduch
Plusy	Pevný	Lehký	Lehký	Zvyšuje pevnost	Nestlačitelný	Lehký
			Lepitelný			Netoxický
Mínusy	Těžký	Špatně lepitelný	Méně pevný	Obtížná kontrola kvality výplně	Těžký	Nebezpečí Imploze
	Obtížně svařitelný	Méně pevný				
1.0			V	X		V
1.1			V			V
1.2						

V – Používáme nebo jsme tuto metodu používali
X – Vyzkoušeli jsme

Rozhodnuli jsme se využít PVC trubky v nichž je vzduch a z obou stran jsou utěsněny. Pro další vývoj uvažujeme pontony vyplněné olejem nebo nestlačitelnou pěnu ošetřenou proti nasákání.

3.1.2 – Testování

V rámci našeho testování jsme vyzkoušeli některé z variant, například plnění pontonů pěnou, která zvyšuje jejich pevnost. Toto řešení se nám ukázalo jako slepá cesta z důvodu nutnosti naplnit nějakým otvorem vnitřní prostor pontonů a následně tento otvor tlakově utěsnit. Pokud bychom tento otvor neutěsnili, tak bychom přišli o výhodu plnění pěny do pontonů. Dále jsme narazili na skutečnost, že kvalita výplně pontonů je v našich podmínkách špatně ověřitelná.

3.2 – Rám

Rám je určen k upevnění jednotlivých součástí dohromady. Rozlišujeme dva typy rámu. Otevřený a uzavřený. Otevřený rám má výhodu v tom, že se na něj dají jednoduše přidávat různá zařízení dle

mise ROV. Další výhodou je stabilita způsobená větší vzdáleností působíště vztlaku od těžiště. Uzavřený rám má výhodu nižšího hydrodynamického odporu, který umožňuje plout vyšší rychlostí za využití stejné práce. Další z výhod je, že se o uzavřený trup nic během ponoru nezachytí. Oproti otevřenému rámu má uzavřený rám blíže působíště vztlaku a těžiště, což umožňuje vyšší volnost v pohybu.

3.2.1 – Požadavky

Rám musí být dostatečně pevný, aby na něj bylo možno připevnit i hmotnější zařízení, včetně přídatného vybavení v závislosti na povaze mise ROV.

3.2.2 – Možnosti

Jako rámy se hojně využívají konstrukce z kovu především z hliníku a jeho slitin. U ROV se také setkáváme s plasty v různých podobách. CPS Drone a další využívají ke konstrukci technologii 3D tisku a vyrábí tak součásti na míru.

Tab. 6: Materiály na výrobu rámu pro ROV

	Hliník	HDPE	PVC	
Plusy	Pevný	Lehký	lehké	
	Populární	Snadno opracovatelný	levné	
	Cenově dostupný		snadno opracovatelné Lepitelné a pevné	
Minusy	Svařování je náročné	Nepříliš pevné	Relativně odolnost, dostačující	
	Těžký v porovnání s HDPE nebo PVC	Dražší než hliník		nejnižší nicméně
	Voděodolné sváry jsou obtížné	Obtížně lepitelné		
	možnost koroze			

Rozhodnuli jsme se rám slepit z PVC trubek, které můžeme snadno řezat, upravovat a spojovat pomocí prodávaných rozboček a kolen. Tuto možnost jsme vybrali z důvodu snadné zpracovatelnosti a dostupnosti i krátkého času nutného na výrobu rámu.

3.3 – Vodotěsný obal

Vodotěsný obal se skládá z několika částí: plášť s přírubami pro snadné uchycení ke gondole, čelní průzor pro kamery, a kabelové průchodky (víku), která nám umožňuje průchod kabelů z vodotěsné gondoly k motorům, senzorům a pozemní stanici.

3.3.1 – Požadavky na těsnost

Odolnost proti tlaku a prostředí působícímu na ROV, bez nutnosti pravidelných kontrol opotřebení. Problematickými jsou zejména kabelové průchodky a spoje různých materiálů.

3.3.2 – Materiály

Tlakový trup

Z hlediska zajištění tlakové odolnosti trupu máme dvě možnosti:

- 1) použít lehký trup a zcela jej vyplnit nestlačitelným materiálem.
- 2) použít těžší tlaku-vzdorný trup podobně jako u klasického ROV.

Tab. 7: Možnosti řešení tlakového trupu

	Ad1) Minerální olej	Ad1) Vylití polymerem	Ad2) Vyplnění vzduchem
Plusy	Nejběžnější způsob těsnění	Druhý nejčastější způsob těsnění	Obsluha
	Minimální nároky na pevnost trupu	Jistota že těsní	Možnost úprav vnitřní elektroniky
Mínusy	Náročná obsluha	Náročná obsluha	Méně spolehlivé
	Přidaná hodnota		

Vyplnění lehkého trupu nestlačitelným materiálem je bezpochyby lákavé řešení, ale nese s sebou řadu omezení. V případě oleje, je při údržbě zařízení nutnost vše vyčistit a poté při zpětném plnění zajistit, aby uvnitř nezůstaly vzduchové kapsy. S tím se pojí další komplikace, a to nutnost návrhu vlastních objektivů pro kamery. Podobně je tomu i v případě zalévacího polymeru. Jeho použití navíc přináší obtížně řešitelné problémy při výměně/opravě elektroniky, neboť to sebou nese nutnost elektroniku vyřezávat nebo vyfrézovat. (Toto řešení se spíše hodí pro zajištění odolnosti proti vodě a tlaku odolnosti dílčích elektronických komponent umístěných mimo tlakové těleso, jako jsou například světla).

Z výše uvedených důvodů (a po uvážení množství úprav vnitřního prostoru a elektroniky ROV, které sebou jeho vývoj přinese) jsme se rozhodli pro tlakový trup vyplněný vzduchem. I když z důvodu vysoké hmotnosti vyloučíme ocel, je výběr materiálů pro konstrukci tlakového trupu stále poměrně široký.

Tab. 8: Materiály pro tlakový trup

	Hliníkové slitiny	Plast	Laminát
Výhody	Cena	Cena	Pevnost
	Pevnost	Snadné opracování	Nízká hmotnost
	Tepelná vodivost		
Nevýhody	Nutnost zkušeností pro opracování	Nízká pevnost	Cena
		Změna vlastností s malou	Složitá výroba
		Změnou teploty	

Tab. 9: Tabulka použitých hliníkových slitin (alupa.cz)

Mechanické a technologické vlastnosti nabízených slitin hliníku												
Označení dle EN AW	Označení dle	Chemické složení	Stav materiálu	Pevnost tahu (Mpa)	Mez Rp (Mpa)	kluzu Rm min.	Tažnost min.	A%	Korozní odolnost	Svařitelnost	Obrobitelnost	
6060	42 4401	AlMgSi	T4	min. 120	60	16			velmi dobrá	velmi dobrá	přijatelná	
			T6	190	150	8						
			T64	min. 180	120	12						
			T66	min. 215	160	8						
6063	42 4401	AlMg0,7Si	T4	min. 130	65	12			velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá	
			T6	min. 200	170	8						
			T66	min. 245	200	8						
6082	42 4400	Al Si1MgMn	T4	min. 205	110	14			velmi dobrá	dobrá	dobrá	
			T6	min. 290	240	8					dobrá	
			T651	min. 300	240	4					dobrá	

V našem případě jsme se rozhodli, že použijeme tlakový trup s vnitřní výplní vzduchem. Toto jsme zvolili z důvodu pevnosti hliníku a možnosti použít ho pro chlazení výkonových prvků elektroniky. Volba výplně vnitřku trupu vzduchem je vhodnější s ohledem na fakt, že se jedná o prototyp, u kterého se počítá s postupným vylepšováním elektroniky.

Ovšem budeme se muset vyrovnat s rizikem vlhkosti plynu, který uzavřeme do vnitřního prostoru ROV.

Průzory

Pro čelní průzor máme výběr jen ze dvou materiálů: sklo a plexisklo. My jsme vybrali plexisklo z důvodu křehkosti normálního skla. Pevnost průzoru lze zvýšit i jeho natvarováním do vypouklého tvaru, který lépe snáší vnější hydrostatický tlak. Jelikož máme v průzoru umístěny dvě kamery (navigační a inspekční), museli jsme tuto možnost nakonec zamítnout z důvodu optického zkreslení, neboť obě kamery nemůžeme zároveň umístit v optické ose sférického průzoru.

Kabelová průchodka

Pro kabelovou průchodku jsme zvolili kompozici tlustého hliníkového plechu s vyvrtanými dírami pro průchod kabelů a zalitými polymerem. Jako polymer jsme zvažovali použít epoxid nebo polyuretan. Zvolili jsme kombinaci obou těchto pryskyřic, konkrétně epoxid z vnitřní strany a polyuretan zvnějšku, protože je po zatvrdnutí měkčí a díky tomu při stlačení se ještě lépe přitiskne ke kabelům.

3.3.3 – Testování

Provedli jsme přibližné výpočty tlakové odolnosti jednotlivých součástí strupu pomocí vzorců užívaných pro tlaková potrubí a záslepky užívané v ropném průmyslu. (drillingformulas.com, steeljrv.com)

Do budoucna plánujeme udělat podrobné výpočty a simulace v programu Ansys.

Tlakových průchodek jsme zhotovili několik a při jejich testování jsme zjistili, že pro dokonalé utěsnění je zapotřebí, aby průchodkou procházeli jen holé odizolované dráty (ne lanka). To se týká i ethernetového komunikačního kabelu, u kterého původně voda pronikla do chráněného prostoru mezi jednotlivými drátky původního lanka (viz obrázek 13).



Obr. 13: Současná průchodka pro ROV V1.1

3.4 – Napájení

Napájení se stará o zásobování jednotlivých systémů ROV elektrickou energií.

3.4.1 – Požadavky

Požadavkem na napájení ROV je dlouhá výdrž, nízká hmotnost, bezpečnost, co nejkratší doba mezi ponory, výkonová kapacita pro motory.

3.4.2 – Možnosti

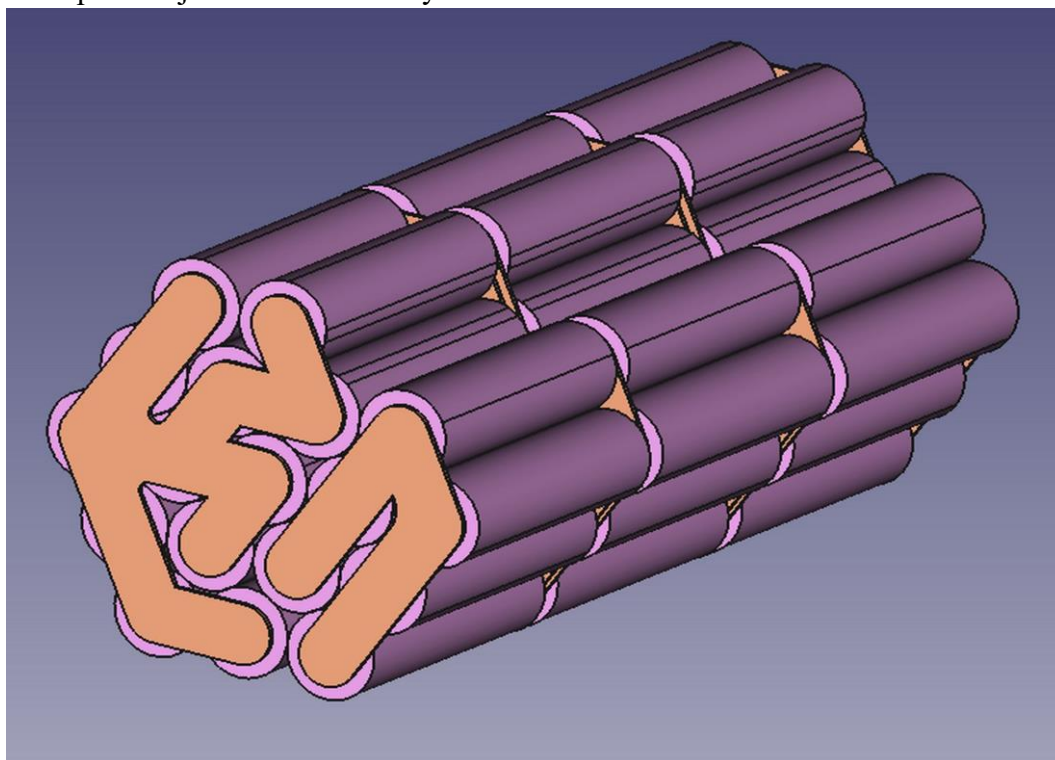
Z hlediska napájení se připadají v úvahu dvě možnosti

- 1) napájení ROV z hladiny
- 2) umístění zdroje elektrické energie (nejčastěji v podobě akumulátoru) přímo do ROV

Tab. 10: Možnosti napájení

	Externí napájení (kabelem) (1)	LiPo (2)	LiIon (2)
Výhody	Bez limitace délky ponoru	Umožňují velké proudové odběry vzhledem ke kapacitě	Možnost stavby vlastních uspořádání vzhledem k využitelnému místu
Nevýhody	Drahá infrastruktura	Při narušení obalu velmi hořlavé	Neumožňují tak velké proudové odběry vzhledem k jejich kapacitě
	Nutnost výkonového kabelu	Náročnější na nabíjení než LiIon	Vyšší hmotnost než Lipo
	potřeba vysokého napětí z důvodu velkého potřebného okamžitého výkonu pro pohon motorů		

Pro napájení naší ROV používáme akumulátory technologie LiPo z důvodu hustoty energie a vysokého vybíjecího proudu, který jsou schopny poskytnout. Do budoucna přejdeme na LiIon akumulátory z důvodu lepšího využití místa v trupu, který je kruhového průřezu a díky tomu můžeme lépe vyplnit tento prostor články typu 18650 (nejběžnější typ LiIon článků), než kvádry, ve kterých se převážně prodávají LiPo akumulátory.



Obr. 14: Nový battery pack 3S 60Ah využívající články LiIon 18650

3.5 – Motorizace

3.5.1 – Požadavky

Zajistit přesné řízení ROV na základě instrukcí řídicího počítače v širokém rozsahu hloubek. Pohonná jednotka nesmí spotřebovávat ani produkovat žádné plyny a musí správně pracovat i v případě, že okolní voda bude obsahovat vysoké procento rozpuštěných solí (mořská voda), pevných částic (např. rozptýlený sediment), části vodních rostlin atp.

3.5.2 – Možnosti

Při použití elektromotorů, se nabízejí následující volby

Tab. 11: Možnosti motorizace

	DC motory	BLDC motory (střídavé synchronní)
Výhody	Jednoduchá regulace výkonu (PWM)	Přesné řízení otáček pomocí ESC řízené komutace
Nevýhody	Obsahují třecí plochy pro přenos energie	Nutnost pokročilého řízení – vyžadují řízení pomocí ESC

Pro naše potřeby jsme vybrali BLDC motory. Konkrétně se jedná o motor, kdy rotor obíhá stator tzv. outrunner A2212 930KV. Jak je vidět v tabulce výše, tak k jejich řízení je zapotřebí specializovaných obvodů. Z důvodu náročnosti vývoje vlastního řízení jsme se rozhodli použít komerčně prodávané ESC viz. tabulka níže.

Tab. 12: Možnosti ESC

	EZRUN 18A	ZMR 20A Bidirectional Brushless ESC	STEVAL-ESC001V1
Výhody	Lepší chladič	Nižší cena	Přesné řízení
		Vyšší proudová zatížitelnost	Možnost přeprogramovat firmware dle potřeby
Nevýhody	Vyšší cena	Horší chlazení	5 – 8x dražší než běžná ESC, Vhodná spíše pro průmysl

Z těchto řídicích obvodů jsme pořídili testovací kusy od prvních dvou zmiňovaných variant.

3.5.3 – Testování

Při testování motoru s ovládacími obvody jsme zjistili, že pro naše účely postačí levnější varianta a tu jsme dokoupili. Dále jsme zjistili, že vinutí motorů je velmi dobře zaizolované a vydrží i působení slané vody.

3.6 – Trustery

Lodní vrtule obvykle doplněné vrtulovou dýzou, která funguje jako tryska vytvářející tah (thrust). Dle konstrukce, resp. profilu dýzy je označována buď jako Kortova nebo Riceova tryska.

3.6.1 – Požadavky

Požadavkem na trustery je, aby měli co nejvyšší účinnost v rozmezí od 0 do 2 ms⁻¹. Krouťivý moment k jejich otáčení nesmí překročit mez, kterou poskytne motor s danou elektronikou, zároveň truster musí poskytovat dostatek tahu k pohybu ponorky v obou směrech. (výkon motoru je nezávislý na směru otáčení)

3.6.2 – Možnosti

Jako možnost se nabízejí lodní šrouby, různá čerpadla a turbíny.

Tab. 13: Možnosti thrusterů

	Lodní šroub	Vysoko průtokové čerpadlo (PumpJet)	Kortova / Riceova tryska
Plusy	Na trhu dostupný	Nízká spotřeba	Vysoká účinnost v malých rychlostech
Minusy	Nízká účinnost	Nízký tah	
		Vyšší cena	

Tab. 14: Námi testované thrustery

	koupené	DIY A	DIY B
plusy	Žádné časové náklady na vývoj	Lehké	3D tisknutelné
		3D tisknutelné	Mechanicky pevnější
Minusy	Nízká kvalita čínských výrobků	Při provozu vznikaly vibrace	Dlouhá doba tisku
		Špatně řešené uchycení motoru a Kortovy trysky	

Z výše uvedených možností jsme většinu prakticky vyzkoušeli.

3.6.3 – Testování

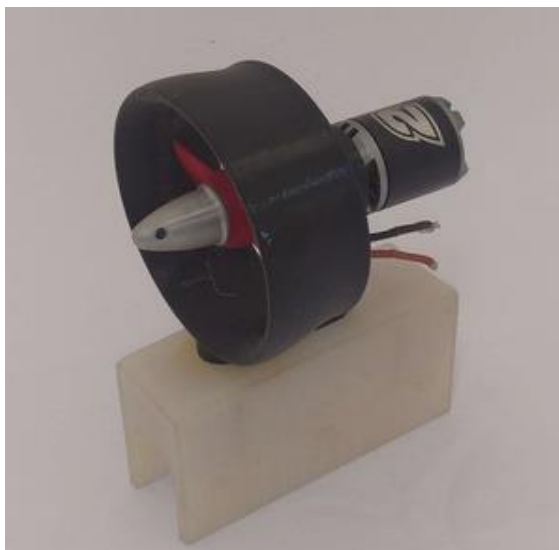
Při našem testování jsme jako první vyzkoušeli DC motory umístěné ve vodotěsné gondole, s průchodkou na lodní hřídel s jednouchým lodním šroubem. Během testů jsme naměřili, že až 80% energie, které do nich dodáme, tak se ztratí v těsnění průchodky (která musí být dimenzována na přetlaky >10bar).

Dále jsme zjistili, že běžné (modelářské) lodní šrouby mají nízkou účinnost.

Z výše uvedených důvodů jsme se rozhodli pro thrustery s vrtulovou dýzou (které mají větší účinnost a tah při nízkých rychlostech) postavených na bázi BLDC motoru (které mohou fungovat zaplavené vodou).

Nejdříve jsme se rozhodli objednat nové trustery z Číny. Po několikaměsíční pauze při čekání na doručení, jsme přišli hned při prvním testu na to, že v přívodních kabelech mají přerušené vodiče. (Motory byly přelepeny páskou s nápisem *quality controll pass*). S ohledem na čas a náklady jsme se rozhodli pustit do vývoje vlastních (DIY) trusterů. Po krátké rešerši podobných projektů v rámci mezinárodní ROV komunity se nám podvedlo identifikovat několik potenciálně vhodných konstrukcí (svseeker.com, hackaday.io). Náš první truster vypadal takto (viz obrázek 19), vyznačoval se dobrým

poměrem výkonu k tahu (*výkon/tah*), k čemuž zřejmě přispívalo i jeho natvarování, odvozené od Riceovy trysky.



Obr. 15: Prototyp trusteru používaný na V1.0



Obr. 16: Současně používaný truster

Testy v laboratoři a v terénu (Chorvatsko) nicméně ukázaly, že i přes dílčí vylepšení, která jsme na něm provedli, trpí původní thurstery značnými vibracemi. Z tohoto důvodu jsme pokračovali v hledání mechanicky odolnější konstrukce thrusteru, kterou jsme nakonec s drobnými úpravami postavili na bázi vytisknutého 3D modelu (použit byl projekt z webu hackaday.io), viz obrázek 16. Při prvních pokusech s nimi jsme zjistili, že mají tah až ~2,5 kg v malých rychlostech.

3.7 – Kamerový systém

Kamerový systém nám umožňuje získávat a přenášet vizuální informace o prostředí, ve kterém se pohybujeme při nízkém zpoždění za realitou.

3.7.1 – Požadavky

Požadavkem na kamerový systém je nízká latence, velké rozlišení a vysoká světelnost. Vysoká světelnost nám umožňuje získávat kvalitní obraz i při nízké míře osvětlení.

3.7.2 – Možnosti

Výběru vhodné kamery jsme věnovali mnoho času. Největším omezením je požadavek na kvalitní obraz i při nízkém osvětlení.

Tab. 15: Vyzkoušené kamery

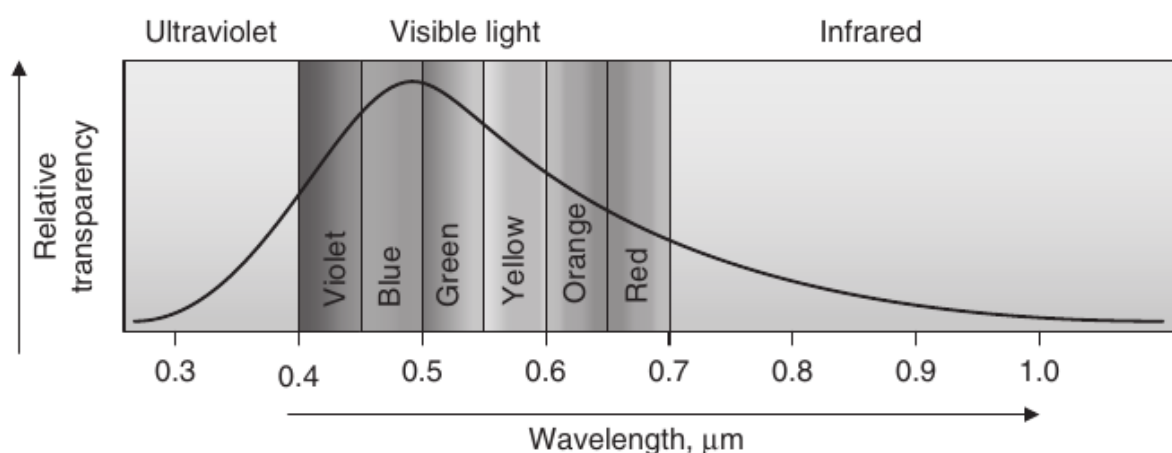
	Aptina-MI5100	IMX291	RPi CAM V2 (IMX219)	RPi HQ CAM (IMX477)	IMX462
Rozlišení	5Mpx	2Mpx	8Mpx	12Mpx	2Mpx
Plusy	Cena	Světelnost	Velikost	Velikost čipu	Světelnost
Mínusy	Nízká světelnost	Přenosová rychlost / latence USB 2.0	Malý CMOS senzor	Jen průměrná světelnost (vyžadují dosvětlování)	Kompatibilita s předinstalovanými drivery

Všechny čipy IMX vyvinula a vyrábí společnost Sony.

3.7.3 – Testování

Z výše uvedených kamer jsme zkoušeli mnoho z nich, s různou přenosovou technologií obrazu. Nejlépe se nám však osvědčila RPi HQ CAM, která je připojená přes MIPI CSI rozhraní k PRi 4B. Nedávno jsme provedli vylepšení kamerového systému o kameru s čipem Sonny IMX462 který má sice nižší rozlišení, ale má několikanásobně větší pixely, což způsobuje dopad většího množství fotonů na jednotlivé foto diody v senzoru. Tato změna nám umožní snížit potřebný výkon světla.

3.8 – Osvětlení



Obr. 17: průsvitnost v jednotlivých vlnových délkách (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 177)

Úkolem osvětlení ponorky je umožnění pořizování vizuálních záznamů v místech, kde není dostatek slunečního záření. Specifikem vodního prostředí je, že k útlumu intenzity světla nedochází rovnoměrně napříč viditelným spektrem 400–700 nm.

3.8.1 – Požadavky

Poskytnout osvětlení objektů pod vodou v plné šířce viditelného světla. Možnost regulace výkonu a vyzářovaného spektra v závislosti na potřebném nasvícení vzhledem k okolnímu prostředí.

3.8.2 – Možnosti

Zde se nabízejí v podstatě jen dvě možnosti:

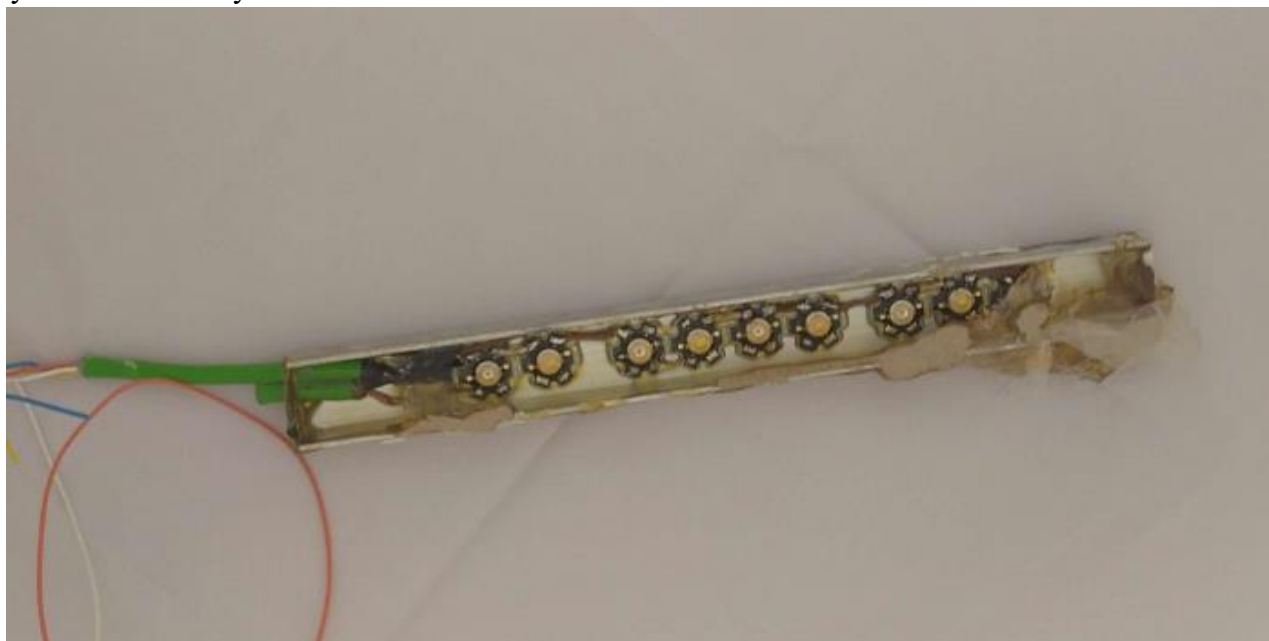
- Koupit světla určená pro potápěče a upravit je k možnosti regulace.
- Postavit si vlastní moduly a ošetřit je proti vodě.

3.8.3 – Testování

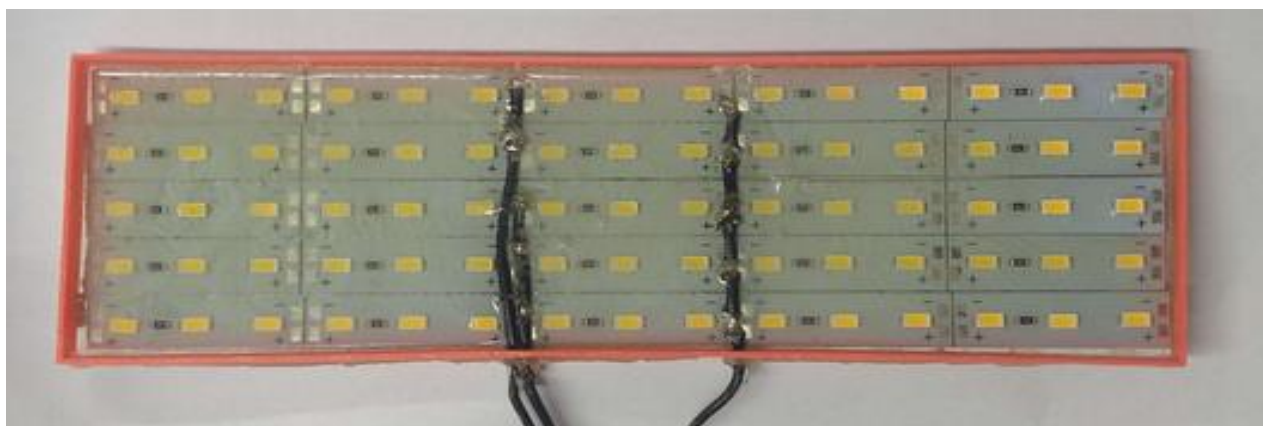
Při našem testování jsme zprvu používali potápěčská světla, která jsme museli před ponorem umístit v takovém množství, v jakém jsme předpokládali potřebu vzhledem k plánované hloubce ponoru. Tyto světla jsme nemohli během ponoru jakkoli ovládat.

Rozhodli jsme se pro vytvoření světél vlastních. Tato světla se skládala z několika výkonových LED umístěných v hliníkovém U profilu a zalita čirým epoxidem. Tento pokus selhal z důvodu špatně namíchaného epoxidu, který kombinací tepelného a chemického působení vody začal vytékat z modulu.

Další pokus jsme provedli s 12V LED pásky, které jsou vyrobeny na hliníkovém pásku. Tento pásek vylepšuje chlazení, jelikož je v přímém styku s vodou. Kolem pásek jsme vytiskli rámečky pro vytvoření formy pro epoxid. Do této formy jsme položili led pásky s připájenými vývody a vše zalili tenkou vrstvou epoxidu. Po zatvrdnutí zůstal na tvrdém epoxidu tenký film ze zbytků tvrdidla. Tento film jsme lihem odstranili a světla vyzkoušeli. Jelikož jsme nikdo neměli cestu k moři, abychom vyzkoušeli odolnost proti slané vodě tak jsme si museli vytvořit vlastní provizorní moře v kbelíku řádným osolením vody.



Obr. 18: Prototyp světél, u něhož došlo k tečení špatně vytvrzené zalévací epoxidové hmoty



Obr. 19: Současně používaný prototyp světel

3.9 – Komunikace

3.9.1 – Požadavky

S ohledem na předpokládané použití ROV ve větších než malých hloubkách (< 10 m) jsme od počátku volili přenos dat kabelem. V rámci vývojových testů a pro aplikace ve sladkých vodách je pro nás dostačující současná maximální délka kabelu 100 m, nicméně pro nasazení v moři a s ohledem na využití max. dostupů ponorky (>250 m) pracujeme na technologiích pro délky do 1 km.

3.9.2 – Komunikační protokol

Pro naši ponorku jsme uvažovali mnoho variant způsobu komunikace, které jsou popsány v následující tabulce

Tab. 16: Sériové komunikační protokoly

	RS-232	RS-485 Half Duplex	RS-485 Full Duplex
Přenosová rychlost	9600b/s @ 150m	660kb/s @ 150m	660kb/s @ 150m
Přenos	Single line	kroucený drát	kroucený drát
Počet žil	3	3	5
Příjem / odesílání	Nepřetržitě	Přepíná mezi příjmem a vysíláním	Nepřetržitě
Plusy	jednodušší protokol	rychlost	rychlost
Mínusy	náchylnější na rušení	Přepínání	Nedostatečná kapacita pro obraz
	Nedostatečná kapacita pro obraz	Nedostatečná kapacita pro obraz	

Z výše uvedených variant protokolů jsme zamítli rádiový přenos z důvodu vysokého útlumu rádiových vln vodou. Další možností je přenos ultrazvukem, zde je problém s odrazy a také s tím že nejsme schopni na ultrazvuk namodulovat dostatečné množství informací pro přenos obrazu. Z důvodu nemožnosti bezdrátového přenosu dat jsme nuceni za ponorkou tahat kabel nebo optické vlákno.

U přenosu dat po drátu je zde několik možností. Lze použít FPV modulaci a tu posílat po koaxiálním kabelu. V této variantě bychom posílali příkazy pro řízení pomocí komunikace RS232 nebo RS485. Tuto možnost jsme vyzkoušeli, avšak z důvodu délky kabelu (100 m) jsme přijímali signál značně zkreslený a tím pádem v nízkém rozlišení, které je nevyhovující.

Další metodou, kterou jsme vyzkoušeli je přenos po protokolu TCP/IPv4, který je využíváný po celém světě k přenosu internetu. Důvod, proč jsme nepoužili TCP/IPv6 je, že pro naši aplikaci nepřináší žádné výhody, navíc existuje větší množství DIY projektů využívajících TCP/IPv4. Za ponorkou táhneme kabel CAT5e po kterém posíláme jak obraz, tak příkazy pro řízení vše v synchronním režimu tak zde může probíhat chybová komunikace v asynchronním režimu a také SSH komunikace pomocí které spravujeme operační systém ponorky Raspbian Lite založený na linuxové distribuci Debian.

V blízké budoucnosti plánujeme výměnu měděného kabelu za optický kabel, který bude obsahovat jak optická vlákna, tak nosné silonové vlákno, které nahradí dosavadní umělohmotný provaz pro mechanické spojení ponorky s místem, odkud byla vypuštěna a je ovládána.

Optický kabel nám také umožní zvětšit délku kabelu bez použití opakovače, který zesiluje signál, ale přidává zpoždění. Tento opakovač je zapotřebí u optických kabelů používat po 20 až 120 km v závislosti na kvalitě použitého kabelu.

Jelikož náš řídicí počítač nedisponuje SFP nebo SFP+ portem pro zasunutí optického přijímače/vysílače. Tento konektor nelze ani přidat rozšiřující kartou. Tuto problematiku budeme řešit přidáním zařízení nazývaného „media converter“ které umožní přidání SFP+ portu na konektor RJ45

3.9.3 – Komunikace SW

U obou softwarů byla zvolena architektura server-client ze strany ROV, tzn. Po spuštění napájení RPi jsou spuštěny servery čekající na iniciaci komunikace ovládací konzoli, která může být spuštěna později. V případě přerušení komunikace ROV automaticky vypne všechny motory a znovu čeká na spojení. Více v části 3.12.



Obr. 20: Živý přenos kamery z řídicího počítače

3.9.4 – Mechanické upevnění komunikačního kabelu

Ovládací kabel je k ponorce mechanicky připevněn k drátové konstrukci na kabelové průchodce, která zajišťuje, aby se kabel nepřežvýkal neustálým ohýbáním u průchodky.

3.10 – Řídící jednotka

Řídící jednotka nebo také řídicí počítač se stará o vykonávání poskytnutých instrukcí. Dnes se k tomuto využívají různé SBC (jednodeskové počítače) na kterých běží operační systém, většinou Linux.

3.10.1 – Požadavky

Pro naše účely jsou zapotřebí minimálně 2 výpočetní vlákna o co nejvyšší frekvenci procesoru. Přítomnost více jader je výhodou. Dále by zde neměly chybět používaná komunikační rozhraní v našem případě konektor RJ45 pro internet MIPI CSI pro připojení vybraných kamer a I²C nebo SPI komunikační rozhraní pro komunikaci s mikroprocesorem řídicí motory a vyčítání ze senzorů.

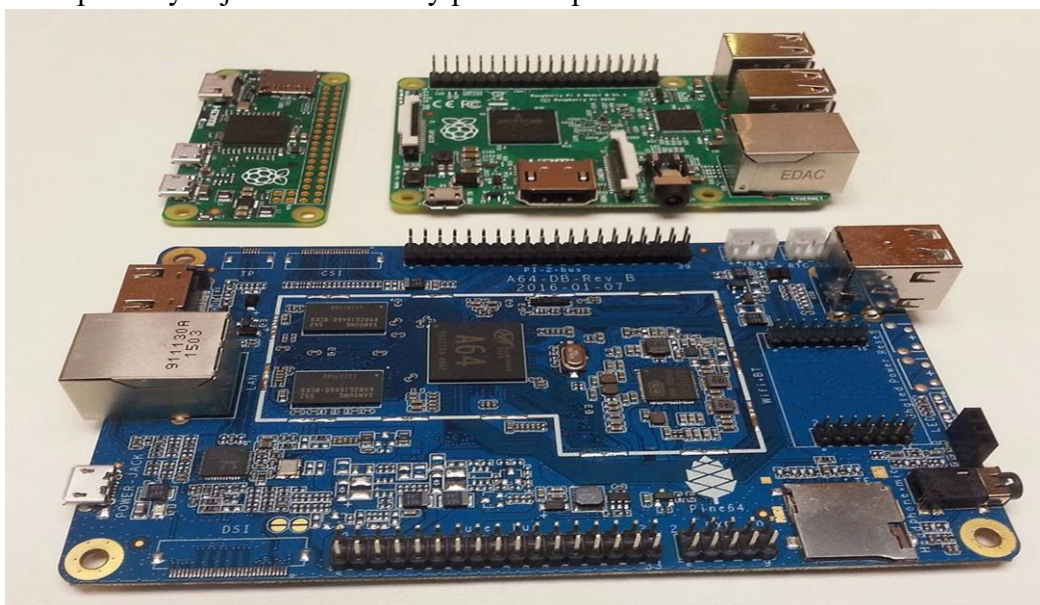
3.10.2 – Možnosti

Možností pro nás jsou různé SBC.

Tab. 17: Možnosti pro řídicí počítač

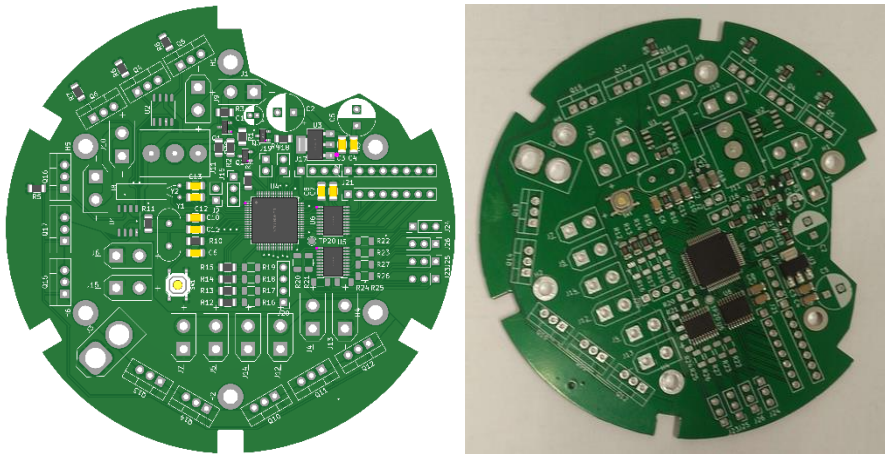
	RPi 4B	RPi 3B+	Jetson	Pine
Počet výpočetních jader	4	4	4	4
Pracovní frekvence jádra [GHz]	1,5	1,4	??	1,152
RAM [GB]	1,2,4,8	1	4,8,16,32	2
Rychlost připojení [Mbps]	1000	100	1000	1000
Komunikační rozhraní	2*USB 2.0 2*USB 3.0 MIPI CSI	4*USB 2.0 MIPI CSI	4*USB 3.0 2*MIPI CSI	2*USB 2.0 MIPI CSI
Spotřeba energie	4W	1,5W	5W	2,5W

Z výše uvedených systémů jsme vyzkoušeli Pine 64 avšak z důvodu podpory a velikosti komunity jsme jej opustili. Přešli jsme na krátkou dobu na RPi 3B+ po vydání RPi 4B jsme na něj vylepšili. Další možné vylepšení je na Jetson Nano, ale jeho výhodu dvou vstupů MIPI CSI mají jen některé základní desky, které se vejdou do ponorky jen složitě. Povedlo se nám najít základní desku RTSO-6001, která se do ponorky vejde a má všechny potřebné periferie.



Obr. 21: porovnání velikosti Pine64 v popředí, Raspberry Pi Zero (vlevo nahoře) a Raspberry Pi 3B (vpravo nahoře) (hackday.io)

Jelikož Raspberry PI 4B nedisponuje PWM výstupy, navrhli jsme vlastní desku postavenou na čipu STM32F030RC. Výběr čipu závisel na počtu timerů a na skutečnosti, že čipy od této společnosti programují. Je zde zvolen model s největší pamětí z důvodu možnosti vylepšit funkce ROV bez nutnosti navrhovat novou desku. Zároveň deska je vyrobena tak, aby se vešla do trupu s vnitřním průměrem 100 mm, který plánujeme použít na V2.0. Deska dále disponuje tranzistory pro možnost odpojení ESC od napájení za účelem snížení spotřeby, kdy nejsou zapotřebí motory, jedná se o mise několika denního pozorování ekosystému. Deska také disponuje digitálním potenciometrem pro řízení proudových zdrojů pro světla. Toto nám umožní regulaci jejich spektra a výkonu.



Obr. 22: Současné PCB – návrh (vlevo) a výsledek (vpravo)

3.11 – Senzory

Senzory jsou nezbytnou součástí elektroniky ROV, slouží k měření základních parametrů vnitřního a vnějšího prostředí ROV, včetně dat z gyroskopů a akcelerometrů sloužících pro inerciální navigaci.

3.11.1 – Požadavky

Měření teploty a tlaku vody, ve které se pohybujeme, dále teplota uvnitř pro identifikování možného přehřátí a vlhkost uvnitř pro detekci pronikající vody dovnitř. Další veličinou, kterou měříme je směrová orientace ponorky

3.11.2 – Výběr

Teplotní čidlo pro měření okolí jsme vybrali DS18B20 z důvodu parazitního napájecího režimu a nízké spotřeby energie. Parazitní režim má tu výhodu, že pokud se do zatěsnění senzoru dostane voda tak to nijak neohrozí elektroniku, protože sem není přivedeno přímo napájecí napětí. Pro měření tlaku máme čidlo se závitem do tlaku 300 psi. Pro měření teploty uvnitř použijeme také DS18B20. Pro měření vlhkosti vyvíjíme vlastní velkoplošný senzor, který okamžitě detekuje průsak vody do trupu. Dále jsme přidali USB mikrofon pro poslouchání jak podmořského života, tak i vlastního hluku (kavitace vrtulí, buzení motorů atp.).

3.12 – Řídící stanice operátora

3.12.1 – Požadavky

Suchozemská ovládací stanice slouží k monitorování pohybu a stavu ROV a ovládání jednotlivých periférií. V současné verzi není ROV autonomní, a tak slouží stanice i k manuálnímu ovládání pohybu a světel. Komunikace obstarávaná kabelem vede data oběma směry s co nejmenší latencí, aby měl operátor nad ROV maximální kontrolu. Veškerá přijímaná data (vyjma kamerového záznamu mimo nahrávání) se okamžitě, označena časovou stopou, ukládají na disk zařízení.

ROV na konzoli zasílá:

1. Živý přenos kamerového záznamu

Stream s minimální latencí. Rozhraní umožňuje přepínat mezi aktivními kamerami, spustit záznam a pořídit snímek, upravovat parametry expozice.

2. Polohu ROV

Je zobrazována inerciální poloha dle IMU jednotky (gyroskop, akcelerometr, magnetometr), kalkulace celkové trasy podle integrace vektorů zrychlení. Dále je zobrazována poloha ve vodním sloupci vypočítaná z tlaku naměřeného barometrem.

3. Vnitřní stav ponorky

Data o teplotě, vlhkosti a tlaku snímaná vnitřními senzory informují operátora o případném problému s přehříváním vnitřních součástí či pronikání vody do hlavního tubusu. Dále je zobrazován stav jednotlivých bateriových článků pro efektivní plánování trasy podle dostupné kapacity. Na obrazovce se stále zobrazuje stav komunikace ROV pro případ přerušení komunikace či selhání palubních systémů.

Pomocí stanice je možné ovládat/regulovat:

1. Rychlost a směr jednotlivých motorů pro plynulý horizontální a vertikální pohyb.
2. Stav a napětí (resp. intenzitu záření) jednotlivých světelných okruhů.
3. Zařízení pro odběr vzorků

Jelikož se jedná o terénní vybavení, musí být stanice současně odolná vůči nárazům, vlhkosti a změnám teploty.

3.12.2 – Možnosti

Zvažované varianty provedení ovládací stanice jsou dány rozhodnutím, zda pro ovládání vyvíjet nové zařízení a s ním spojené systémy, či použít existující přenosné zařízení – notebook.

Vzhledem k tomu, že vytváření vlastní stanice by otevřelo nemalou větev vývoje vyžadující mnoho prostředků a času, jsme se rozhodli pro současnou verzi vyvinout pouze softwarové řešení použitelné s jakýmkoliv počítačem. Relativní jednoduchost programování grafického rozhraní a užití klávesnice k ovládání umožňují rychlý vývoj v kratším čase, současně je software velmi portabilní. Kromě samozřejmých zlepšení grafického rozhraní je do budoucích verzí plánovaná implementace joysticku místo klávesnice, což umožní jednodušší a plynulejší ovládání všech funkcí ROV.

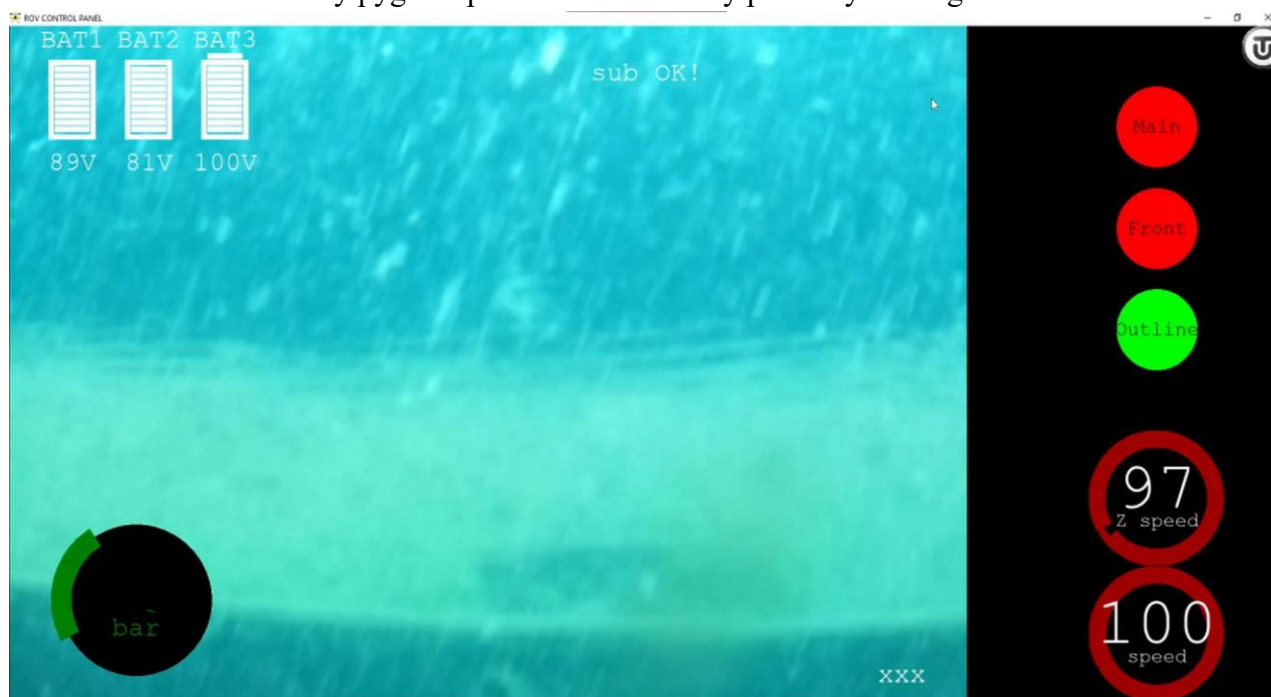
3.12.3 – Současné řešení

Ovládací rozhraní

Software řídicího počítače je psaný v jazyce Python, využívá knihovny pygame pro grafické rozhraní. Pomocí objektově strukturovaného kódu je rozhraní založeno na systémových událostech (stisknutí klávesy) a pravidelném vyměňování komunikačních paketů s ROV. Tyto pakety ve formátu JSON jsou zkompileovány ze současného vstupu operátora (rychlost, směr, stav světel, odběrové zařízení) a zaslány (cca 30x za vteřinu) pomocí knihovny Zero-MQ přes protokol TCP/IP ethernetovým kabelem do RPi4. Na straně Rpi4 jsou data o požadovaném stavu ovladatelných prvků dekompileována a předána STM32. Po přijetí ovládacího packetu ROV odpoví datovým packetem s výstupem jednotlivých senzorů a případně chybových kódů v případě selhání jednotlivých systémů ROV. Tyto kódy dávají informaci o průběhu daného packetu, tzn. zda byl úspěšně přijat, dekompileován a zpracován STM32. Tyto kódy odpovídají stavu komunikace ROV, dávají tedy najevo, zda není přerušeno spojení ethernetu / palubních systémů, či zda pakety nejsou poškozené při přenosu.

Vizualizace stavu ponorky probíhá formou widgetů v hlavním okně, kdy pozadí tvoří obraz kamery. Senzorické údaje jsou zobrazovány číslem a graficky současně. Zobrazován je současně

nastavený výkon motorů, stav světel a odběrového zařízení. Pro účely grafického rozhraní byla vytvořena nadstavba knihovny pygame pro usnadnění tvorby potřebných widgetů.



Obr. 23: GUI ovládací obrazovky ROV

Přenos obrazu

Obraz je přenášen pomocí knihovny ImageZMQ pro python, která využívá dalšího portu na TCP/IP komunikaci přes ethernetový kabel. Pro oddělení případných problémů s komunikací běží stream na ROV nezávisle na ostatním ovládní. Rpi4 využívá knihovny OpenCV s toolkitem imutils na získání obrazu ze zvolené kamery a ihned jej (bez lokálního ukládání) pošle ethernetovým spojením. Ovládací stanice přijímajíc snímek obrazu jej zpracuje – transformuje na velikost okna ovládacího panelu.

3.13 – Odběrová zařízení

3.13.1 – Požadavky

Od výše uvedených odborníků (2.2) jsme získali podklady, jaké informace je zajímavé shromažďovat pro laboratorní analýzu. Z těchto konzultací vyplynulo několik principů pro sběr vzorků.

- Mechanické kleště schopné chytout kus rostliny a za pomoci motorů ponorky tento kus utrhout nebo odstříhnou a následně nasát do odběrového zařízení. Před nasátím je vzorek vyfocen za účelem identifikace.
- Odběrové zařízení na vodu schopné nabrat několik vzorků vody během ponoru, aniž by se tyto vzorky vzájemně kontaminovali
- Odběrové zařízení filtrující plankton z vody. Schopnost odebrat několik vzorků během ponoru, aniž by se tyto vzorky vzájemně kontaminovali.

3.13.2 – Řešení

Mechanické kleště s nasávacím zařízením pro odběr vzorků

Pro odběrové zařízení jsme navrhly mechanické kleště, které umožňují připevnit např. břity pro odstřížení vzorku. Kleště jsme umístili do dolní části zorného pole kamery. Vedle kleští je umístěna nasávací hadice. Která nám dovoluje nasát ustřížený vzorek do filtračního koše odběrového zařízení (vysavače). Koš vysavače je složen z nádoby, ve které je nerezové síto, přes které pumpa nasává vodu a tím vytváří v odběrovém koši mírný podtlak.



Obr. 24: Nasávací odběrové zařízení

Odběrové zařízení na vodu

Odběrové zařízení na vodu jsme zhotovili z injekčních stříkaček. Díky tenkému, téměř kapilárnímu hrdlu bude probíhat cirkulace (kontaminace) vody minimálně.

Odběrové zařízení s filtrem

Pracuje na stejném principu jako vysavač (3.13.2.1) avšak s tím rozdílem, že filtry jsou mnohem menší a je možnost pomocí mechanismu filtry během ponoru měnit. To nám umožňuje nabrat několik vzorků během jednoho ponoru a tyto vzorky mezi sebou nekontaminovat. Měnění filtrů probíhá za pomoci zásobníku, který při obdržení instrukce pro výměnu filtru, vytlačí z pozice stávající filtr a nahradí ho novým.

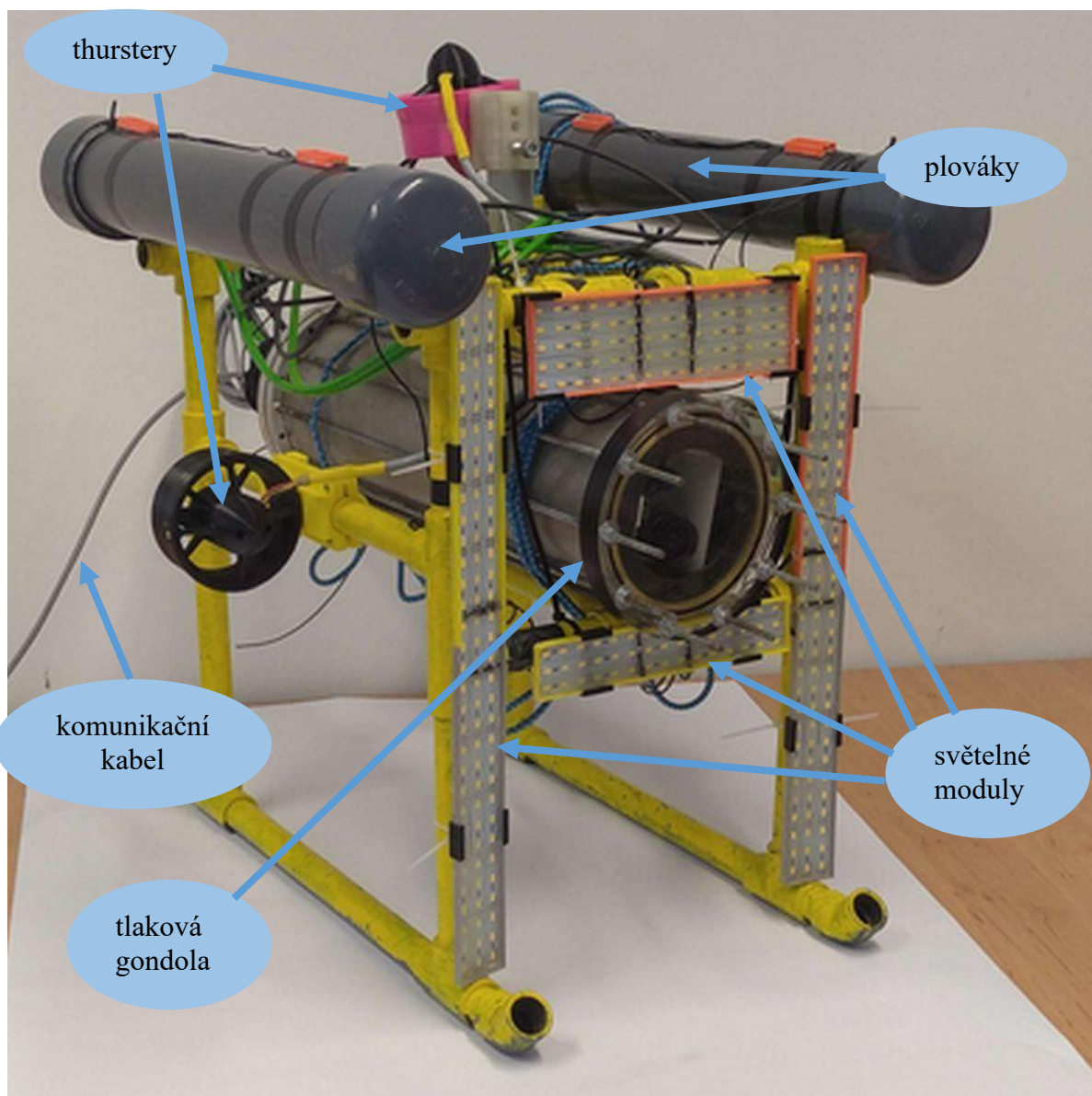


Obr. 25: Prototyp odběrového zařízení na filtraci planktonu

Kapitola 4 – Integrace systému, testy a výsledky.

4.1 – Integrace

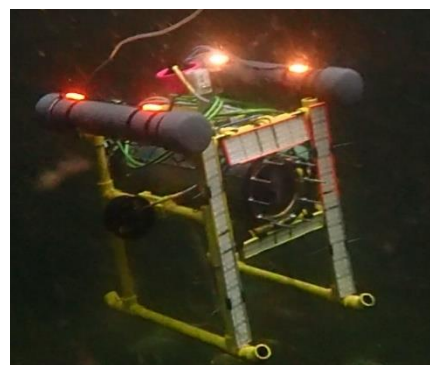
Ponorku se nám podařilo sestavit velmi modulárně, jedinou výjimkou je absence konektorů na průchodce. Z tohoto důvodu nelze motory a světla elektricky odpojit bez přestřížení kabelu. Mechanicky je vše rozebíratelné a zpětně složitelné. Kabelová průchodka umožňuje přidělení kabelů na konstrukci, která je součástí průchodky a díky tomu se kabely nezalamují. Na kabely mimo průchodku jsme použili lanka pro lepší ohebnost a vyšší vodivost pro vysoké frekvence.



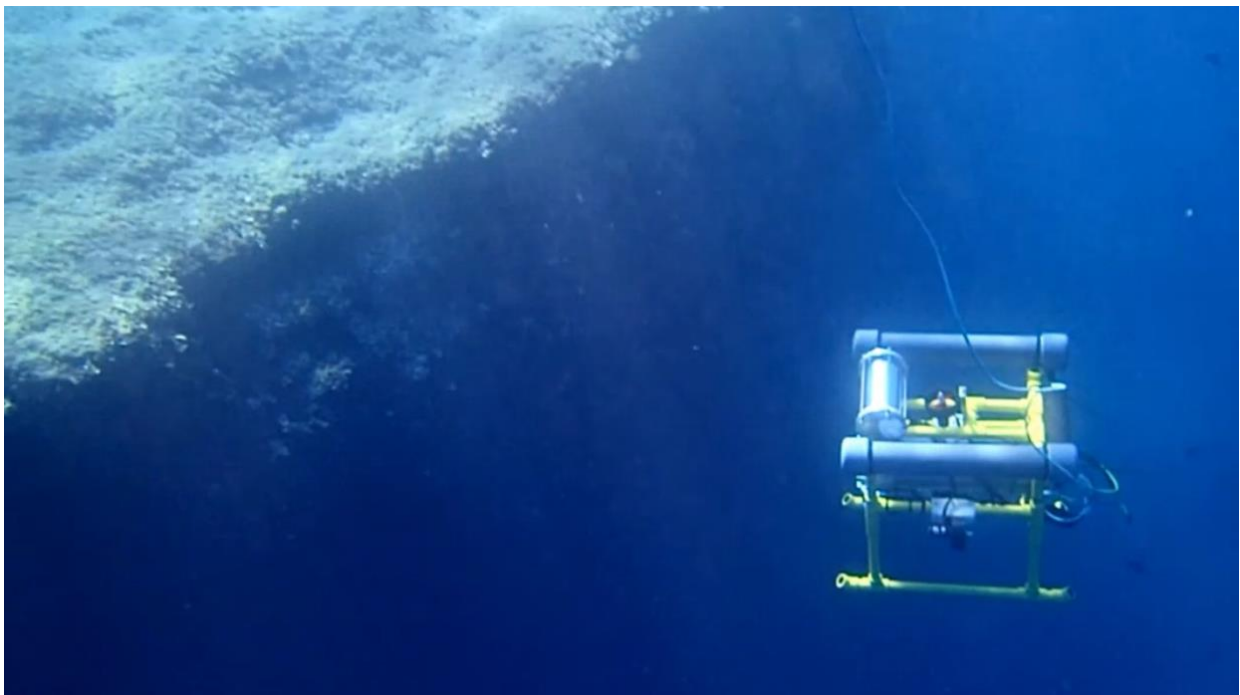
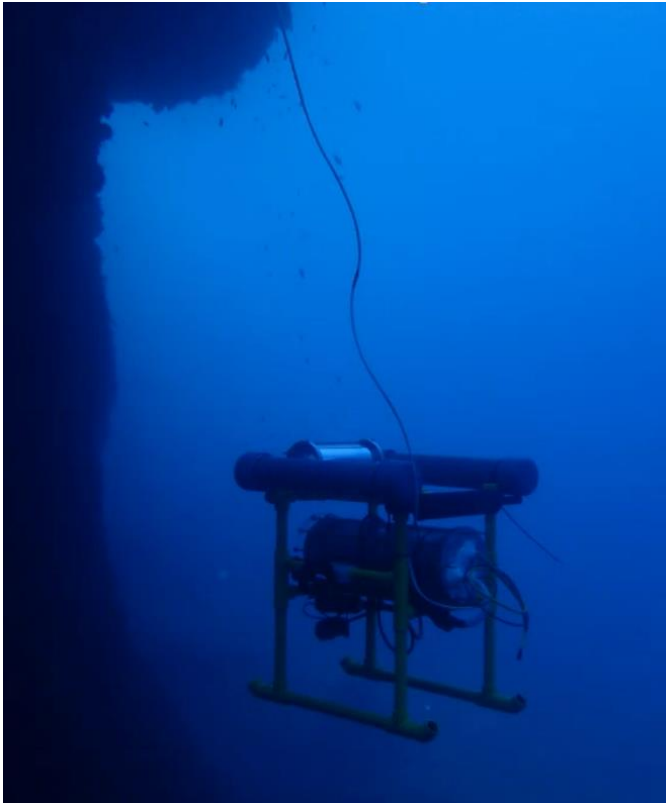
Obr. 26: ROV VI.1

4.2 – Testy a výsledky

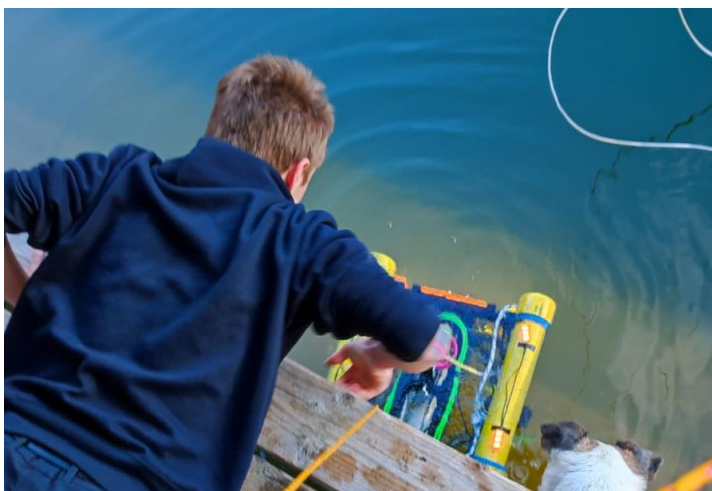
Ponorku jsme dlouhou dobu testovali na vodotěsnost a na třetí pokus se nám dovnitř tlakového trupu nedostala voda. Stěny ponorky se sice orosily, ale kapičky vody se nespojily. V poslední době jsme také provedli řadu testů na stabilitu řídicího SW. Při testech jsme narazili na chybu, která způsoboval zamrznutí SW, ale tu se nám povedlo odstranit.



Obr. 27: Testování v požární nádrži



Obr. 28: Testování na expedici v Chorvatsku



Obr. 29: Testování v zatopeném lomu Leštinka (přímo po krajském kole SOČ)

4.3 – Testovací ponory

Tab. 18: Testovací ponory

Číslo ponoru	Verze	Datum	Lokalita	délka	hloubka
0	1.0	21.9.2019	Chorvatsko	2h	1,5m
1	1.0	23.9.2019	Chorvatsko	30 min	14,5m
2	1.0	23.9.2019	Chorvatsko	1h	17m
3	1.0	24.9.2019	Chorvatsko	1h	17,5m
4	1.0	28.9.2019	Chorvatsko	30 min	4,5m
5	1.1 a	Říjen 2022	JHV	3h	3,5m
6	1.1 b	Listopad 2022	JHV	3h	3,5m
7	1.1 c	Prosinec 2022	JHV	3h	3,5m
8	1.1 c	25.8 2022	JHV	15min	3,5m
9	1.1 c	17.9 2022	Praha	18min	0,5m
10	1.1 c	12.3 2023	JHV	20min	3,5m
11					

Tab. 19: Provedené testy během testovacích ponorů

Číslo ponoru	Verze	Cíl testu	výsledek	Pozn.
0	1.0	Vodotěsnost průchodek		2)
1	1.0	Vodotěsnost průchodek		2)
2	1.0	Řízení, kamery		1)
3	1.0	Řízení, kamery		1)
4	1.0	Kamery, světla		1),3)
5	1.1 a	Vodotěsnost	Negativní	Bez elektroniky
6	1.1 b	Vodotěsnost	Negativní	Bez elektroniky
7	1.1 c	Vodotěsnost	Pozitivní	Bez elektroniky
8	1.1 c	Funkčnost elektroniky	Pozitivní	plný výkon motorů, vybita baterie
9	1.1 c	Funkčnost elektroniky		Spolu s CPS drone
10	1.1 c	Test světel	pozitivní	
11				

1. Při testech jsme zjistili, že hlavním problémem je vysoká latence zobrazení obrazu z kamery na řídicí konzoli operátora.
2. Dále jsme zjistili, že ve vyšších otáčkách motorů dochází ke kavitacím, které naštěstí nemají výrazný vliv na opotřebení vrtulí. Z tohoto důvodu jsme se je rozhodli navrhnout znovu.
3. Noční ponor. Při těchto ponorech jsme zjistili, že ovládání světel z vnitřku ponorky je nezbytné.
4. Z testovacích ponorů, které probíhaly před expedicí do Chorvatska, se nedochovaly všechny záznamy. Máme „jen“ pár desítek minut videa a fotografie pořízené potápěči na expedici v Chorvatsku.

5. K některým systémům ROV verze 1.0 se nedochovala všechna technická dokumentace.

Kapitola 5 – Shrnutí projektu a závěr

5.1 – Shrnutí průběhu a výsledků

I přes velkou náročnost a složitost projektu se nám daří úspěšně posouvat vývoj kupředu a dosahovat vytyčených milníků a cílů. Z nich stojí za zmínku zejména:

1. Provedení testů, jak v moři tak i sladkých vodách, v rámci kterých jsme ověřili navrženou koncepci a uspořádání ROV a následně otestovali navržené modernizační prvky.
2. Úspěšný vývoj nových thrusterů vlastní konstrukce
3. Úspěšný vývoj vlastního řídicího HW a SW.
4. Úspěšný vývoj napájení ROV a dálkově ovládaná podvodní světla
5. Dle požadavků uživatelů navrhnout a sestavit 3 odběrová zařízení spolu s manipulátorem pro hydrobiologický a ekotoxikologický výzkum a provést jejich ověření v kontrolovaných podmínkách.
6. Úspěšně probíhající vývoj modernizačních prvků pro verzi V1.2, podrobnosti viz Tab19

Aktuálně probíhá plánovaná modernizace ROV verze 1.1 na verzi 1.2. V rámci toho plánujeme v průběhu dubna a května 2023 uskutečnit několik dalších testovacích ponorů v lomech a pískovnách v okolí Pardubic.

Tab. 20: Přehled vyvíjených a postupně realizovaných vylepšení verze V1.1 na verzi V1.2.

subsystémy	Parametry ROV V1.1	Parametry ROV V1.2
Plováky	PVC komory naplněné vzduchem. V rámci testů tvrdá pěna se zátěrem.	Tvrdá pěna (PUR) ošetřená laminací
Rám	PVC trubky	PVC trubky
Trup	Hliník 6063	Hliník 6063 nebo 6082, zesílená kabelová průchodka
Napájení	LiPo 3S 5-10 Ah nebo LiIon 60 Ah	LiIon 3S 60 Ah
Trustery	3x* Verze 2	6x Verze 2 *
Kamery	RPi HQ CAM, IMX 462	RPi HQ CAM, IMX 462
Světla	LED 12V	LED 12V
Komunikace	Ethernet TCP/IPv4	optický kabel TCP/IPv4
Řídicí jednotka	Raspberry PI 4B	Raspberry PI 4B
délka kamelu	100 m	řádově vyšší stovky metrů
rozměry[V:Š:D]	60 * 60 * 80	60 * 60 * 80
hmotnost	13 Kg	15 Kg
rychlost	3 uzly	3,5 uzly
výdrž	1 – 8 h v závislosti na použitých bateriích a využívání motorů*	1 – 8 h v závislosti na použitých bateriích a využívání motorů
max hloubka	100 m	300 m

* díky implementaci řídicí desky vlastní konstrukce s mikroprocesorem STM32F030RC

5.2 – Navázané spolupráce

V rámci projektu jsme navázali spolupráci s několika institucemi, které projevíly zájem o využití našeho ROV pro vědecký výzkum.

Jmenovitě se jedná o:

prof Zdeněk Ďuriš, PřF Ostravská Univerzita – výzkum mořských korýšů středních hloubek 200 - 1000m

prof Ivan Čepička, PřF UK Praha – sladkovodní a mořská protistologie

Kateřina Nováková PhD., Recetox – Ekotoxikologie vodních ekosystémů

Ivan Rous, Severočeské muzeum Liberec – plánovaná spolupráce na projektu hledání ponorky Reichenberg (stránky projektu: <https://www.muzeumlb.cz/clanky/detail-clanku/id/u206-reichenberg-a-tragedie-ocean-victor>)

Navázaná byla též spolupráce s autory projektu CPS drone (stránky projektu: <https://www.cpsdrone.com/>).

5.3 – Plány do budoucna

Do konce roku 2023 plánujeme vyvinout nový tlakový trup o větší délce a menším průměru. Díky této úpravě nejen vzroste maximální hloubka ponoru, ale zároveň se zvýší kapacita baterií (3S) až na 160Ah což nám umožní výrazně zvýšit dobu ponoru. Spolu s novým trupem plánujeme v roce 2024 zahájit také vývoj nové verze ROV (V2.0) s 8 motory a vysokou manévrovatelností (CB ~ CG), která bude využívat asistenční řídicím SW. Náš další postup můžete sledovat na webových stránkách projektu <https://technecium.org/projekty/rov-knowtilus/>.

5.4 – Závěr

Dosažené výsledky nám potvrzují, že se daří naplňovat cíl projektu, kterým je navrhnout a postavit levné, snadno ovladatelné, přenosné a spolehlivé ROV pro malé hloubku (<250m) disponující vlastnostmi a univerzálností profesionálních ROV střední třídy, které je schopné jak nasazení pro vědecký výzkum na odborných pracovištích, tak provozování studenty a veřejností, a které by umožnilo významně rozšířit možnosti participace veřejnosti na výzkumu a ochraně zranitelných vodních ekosystémů a jejich společenstev.

Projekt nám vedle uspokojení ze zajímavé tvůrčí práce ukazuje nové možnosti profesního uplatnění, učí nás novým způsobům řešení problémů, obohacuje o praktickou zkušenost s experimentálním vývojem a dává nám příležitost potkávat nové a inspirující osoby ze zajímavých oborů.

Přehled použitých zdrojů

Literatura

Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, (2007) The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles

dostupné z: <https://ntcontest.ru/upload/iblock/52d/52d49cf6584942a6f5479d0402a35bf9.pdf>

Hawaii Pacific University Oceanic Institute Aqua Facts. Dostupné z:

<http://www.oceanicinstitute.org/aboutoceans/aquafacts.html> (19. 9. 2016).

National Oceanic and Atmospheric Administration How Much of the Ocean Have We Explored? *Dostupné z:* <http://oceanservice.noaa.gov/facts/exploration.html> (19. 9. 2016).

Ocean Modules V8 Sii. *Dostupné z:* <http://www.ocean-modules.com/rov.html> (13. 9. 2016).

Lighthouse ROV Perseo. *Dostupné z:* <http://www.lighthouse-geo.com/equipment/rov/rov-perseo/> (13. 9. 2016).

DWTEK Remotely Operated Vehicle, ROV. *Dostupné z:* <http://www.dwtekmarine.com/products.php?sn=11&level=1&menu=11> (13. 9. 2016).

AC-CESS AC-ROV 100. *Dostupné z:* <http://ac-cess.com/index.php/products/ac-rov-100/ac-rov-100-overview> (2. 2. 2016).

Outland Technology ROV 1000 Model. Available online: <http://www.outlandtech.com/rov100.php> (13. 9. 2016).

Romano Capocci, Gerard Dooly, Edin Omerdić, Joseph Coleman, Thomas Newe and Daniel Toal (2017). Marine Science and Engineering: Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review, *dostupné z:* <https://www.mdpi.com/2077-1312/5/1/13>

Internet

alupa.cz (25.3.2023) *dostupné z:* <https://www.alupa.cz/>, <https://www.alupa.cz/documents/ke-stazeni/normy-chemicke-slozeni-chemicke-vlastnosti-1508327516.pdf?v=1>

aniwaa.com (25.3.2023) *dostupné z:* <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/drones/best-underwater-drones/>

Hackday.io (25.3.2023) *dostupné z:* <https://hackaday.com/2016/04/21/pine64-the-un-review/>

Hackday.io (25.3.2023) *dostupné z:* <https://hackaday.io/project/18036-cheap-rov-thruster>

Poradme.se (25.3.2023) *dostupné z:* http://poradme.se/index.php?title=Spole%C4%8Denstva_vodn%C3%ADch_ekosyst%C3%A9m%C5%AF

Samuraj-cz.com (25.3.2023) *dostupné z:* <https://www.samuraj-cz.com/clanek/opticka-a-metalicka-kabelaz-pro-site-lan-a-san/>

drillingformulas.com (25.3.2023) *dostupné z:* <https://www.drillingformulas.com/collapse-pressure-property-for-oilfield-tubular/>

steeljrv.com (25.3.2023) *dostupné z:* <https://www.steeljrv.com/how-to-calculate-blind-flange-thickness.html>

svseeker.com (25.3.2023) *dostupné z:* <https://www.svseeker.com/wp/sv-seeker-2/underwater-rovs/open-source-towed-sonar-rov/thrusters/>

solarnavigator.net (26.3.2023) *dostupné z:* http://www.solarnavigator.net/kort_nozzle.htm

researchgate.net (25.3.2023) *převzato z:* https://www.researchgate.net/publication/239983004_Experimental_Measurement_of_ROV_Tether_Tension

muzeumlb.cz (14.5.2023), U-206 Reichenberg a tragédie Ocean Victor, *dostupné z* [U-206 Reichenberg a tragédie Ocean Victor – Severočeské muzeum v Liberci \(muzeumlb.cz\)](https://www.muzeumlb.cz)