



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

VÝVOJ MICRO ROV PRO VÝZKUM EXTRÉMNÍCH PROSTŘEDÍ

Jakub Filip, František Beneš

SPŠE a VOŠ Pardubice, Karla IV 13, 530 02 Pardubice
Gymnázium, Pardubice, Mozartova 449, 530 09 Pardubice

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval/a samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

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

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování 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

Jméno a Příjmení autora (totéž pro všechny autory)

Poděkování

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

Anotace

Ve své práci se zabýváme designem a konstrukcí robotické ponorky třídy Mikro ROV vhodného svojí univerzálností a přizpůsobitelností pro výzkum širokého spektra extrémních prostředí jako je výzkum řas pod ledovou pokrývkou v Antarktidě, zatopených rudných dolů v Příbrami, výzkumu hlubokomořských ryb nebo krevet v mezopelagiálu, mapování společenstev korálových útesů nebo 3D snímkování vraků z 2. světové války.

Dosažené výsledky, nám potvrzují, že se daří naplňovat cíle projektu, kterým je navrhnout a postavit dostupný, snadno ovladatelný, přenosný a spolehlivý ROV schopný v oblasti výzkumu a ochrany vodních ekosystémů, podvodní archeologie, geologie atp.

Klíčová slova

Dálkové řízení; mechatronika; ROV; robotická ponorka; hydrobiologie, archeologie, enviromentální robotika v extrémních prostředích

Obsah

Seznam zkratk.....	7
Kapitola 1 – Úvod.....	8
1.1 – Možnosti konstrukce nízkonákladového Mikro ROV.....	9
1.2 – Záměry a cíle projektu.....	9
1.3 – Potřeby uživatelů.....	9
1.4 – Systémové požadavky.....	11
Kapitola 2 – ROV, systémová úroveň.....	12
Přehled systémů.....	12
Schéma zapojení elektroniky.....	13
Kapitola 3 – Dílčí subsystémy a jejich vývoj.....	14
3.1 – Plováky.....	14
3.1.1 – Požadavky.....	14
Zvolené řešení.....	15
3.2 – Rám a trup.....	15
Požadavky.....	16
Zvolené řešení.....	16
3.3 – Tlakový trup.....	17
Požadavky.....	17
Materiály pro tlakový trup.....	17
Průzory.....	18
Kabelové průchodky.....	18
Zvolené řešení.....	19
3.4 – Napájení.....	19
Zvolené řešení.....	20
3.5 – Motorizace.....	20
Požadavky.....	20
Zvolené řešení.....	21
3.6 – Thrustery.....	21
Zvolené řešení.....	22
3.7 – Kamerový systém.....	23
3.8 – Osvětlení.....	24
Požadavky.....	24
Zvolené řešení.....	24
3.9 – Komunikace.....	25
Komunikace SW.....	25
Mechanické upevnění.....	26
Zvolené řešení.....	26
3.10 – Řídící jednotka.....	26
3.10.1 – Požadavky.....	26
3.11 – Senzory.....	28
Požadavky.....	28
Zvolené řešení.....	28
3.12 – Řídící stanice operátora.....	28
Požadavky.....	28
Řešení ovládacího rozhraní.....	29
Řešení přenosu obrazu.....	30
3.13 – Odběrová zařízení.....	30
Požadavky.....	30

Mechanický manipulátor.....	31
Nasávací zařízení pro odběr vzorků s filtrem.....	31
Odběrové zařízení na vzorky vody pro chemickou analýzu.....	31
Kapitola 4 – Integrace systému, testy a výsledky.....	31
4.1 – Integrace.....	31
4.2 – Testovací ponory.....	32
Kapitola 5 – Shrnutí projektu a závěr.....	34
5.1 – Shrnutí průběhu a výsledků.....	34
Přehled použitých zdrojů.....	35
Literatura.....	35
Internet.....	36
Příloha 1 Stručný úvod do problematiky ROV.....	37
ROV inspekční/observační třídy vč. Mikro ROV.....	39
Design a vlastnosti současných ROV.....	40
Vztlak a stabilita.....	41
Uspořádání pohonných jednotek (thrusterů).....	43
Elektronika ROV, způsoby komunikace, senzory, mechatronické manipulátory.....	44
Kamery.....	44
Světla.....	45
Zdroj energie.....	45
Řídící stanice operátora.....	45
Komunikační kabel – „tether“.....	45
Přídavné vybavení:.....	45
Sonar.....	45
Dopplerův záznamník rychlosti (DVL, Doppler Velocity Logger).....	45
USBL.....	45
Drapáky, manipulátory a jiné nářadí.....	45
Příloha 2 - Přehled stávajících systémů Mikro ROV a jejich vlastností.....	47

Seznam obrázků

Obr. 1: Open frame ROV 1.1.....	11
Obr. 2: Hydrodynamický hybrid-frame ROV2.0.....	11
Obr. 3: Schéma pracovního nasazení ROV (převzato z: researchgate.net).....	12
Obr. 4: Hydrodynamický kryt.....	13
Obr. 5: Nosný rám.....	13
Obr. 6: Blokové schéma napájení elektroniky.....	13
Obr. 7: Blokové schéma komunikace uvnitř ROV.....	14
Obr. 8: Nosný rám ROV V2.0.....	16
Obr. 9: Schematické znázornění penetrátoru(rovmaker.com, upraveno).....	18
Obr. 10: Působení vnějšího tlaku na trubku (drillingformulas.com).....	19
Obr. 11: Vzhled ROV V2.0.....	19
Obr. 12: Vizualizace velkého lodního thrustru (wartsila.com).....	21
Obr. 13: Truster pro ROV V2.0 včetně mechanismu pro uchycení.....	23
Obr. 14: Komerčně prodávané bílé světlo.....	25
Obr. 15: Porovnání velikosti NVIDIA JetsonNANO s RaspberryPi 3B+ (www.arrov.com, upraveno).....	27
Obr. 16: Námi navržené desky pro rozšíření funkcí řídicího počítače.....	27
Obr. 17: Rozmístění elektroniky v trupech ROV V2.0.....	32

Seznam tabulek

Tab. 1: Systémové požadavky na ROV 2.0.....	11
Tab. 2: Porovnání otevřeného a uzavřeného rámu.....	15
Tab. 3: Materiály na výrobu rámu a <i>hydrodynamického</i> krytu pro ROV.....	16
Tab. 4: Možnosti řešení tlakového trupu.....	17
Tab. 5: Materiály pro tlakový trup.....	18
Tab. 6: Parametry použitých hliníkových slitin (alupa.cz, upraveno).....	18
Tab. 7: Možnosti napájení.....	20
Tab. 8: Možnosti motorizace.....	20
Tab. 9: Možnosti ESC.....	21
Tab. 10: Možnosti thrusterů.....	22
Tab. 11: Námi testované thrusty.....	22
Tab. 12: Vyzkoušené kamery.....	23
Tab. 13: <i>Vhodné SBC pro konstrukci řídicího počítače</i>	27
Tab. 14: <i>Realizované testovací ponory v rámci vývoje technologií pro ROV 2.0</i>	32
Tab. 15: <i>Provedené testy technologií pro ROV 2.0 v rámci testovacích ponorů</i>	33
Tab. 16: <i>Porovnání ROV V1.2 a V2.0</i>	35
Tab. 17: <i>Komerčně prodávaná ROV (zdroj: aniwaa.com)</i>	47

Seznam zkratek

PWM	Pulse Width Modulation	Pulzně Šířková Modulace
HDPE	High Density PolyEthylen	
PVC	Poly Vinyl Chloride	
STM32	Mikroprocesur od společnosti ST	
RPi	Raspberry Pi	Jednodeskový počítač od společnosti Raspberry Pi
ESC	Electronic Speed Controller	
SBC	Single Board Computer	Jednodeskový Počítač
DIY	Do-It-Yourself	Udělej si sám
ROV	Remoute Underwater Vehicle	
AUV	Autonomous Underwater Vehicle	
UUV	Unmaned Underwater Vehicle	
DVL	Doppler Velocity Logger	Přístroj na měření rychlosti pomocí dopplerova jevu
USBL	Ultra Short Base Line	Systém 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

Oceány pokrývají 71 % zemského povrchu 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 méně než 10 % světových oceánů (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Obdobná situace panuje také v případě sladkovodních ekosystémů. Vodní ekosystémy jsou v současnosti nejvíce člověkem ovlivněným typem ekosystémů a jejich společenstva patří k nejzranitelnějším *.

(Pozn pod čarou, Fytoplankton a zooplankton, fyto-bentos a zoobentos, makrofyto-cenózy 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 perlodka říční již vymizely z 90 % původních lokalit. (poradme.se,2023))*

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 underwater vehicle, dále jen „ROV“). ROV lze použít k nahrazení potápěčů v podmínkách, které jsou pro jejich působení příliš nebezpečné nebo technicky obtížně dostupné. Sběr dat nebo jiné úkoly pod vodou mohou být vykonávány s mnohem vyšší efektivitou díky možnosti 24/7 operací s video zpětnou vazbou a dalšími vědeckými údaji, které jsou neustále přenášeny operátorovi na povrch a průběžně ukládány.

Nasazení a využívání ROV velké a střední velikosti limituje kromě jejich pořizovací ceny (200 000 až desítky milionů \$) také potřeba rozsáhlé podpůrné infrastruktury – mateřské plavidlo s jeřábem a navijákem, hangár atp. a finanční náklady s tím spojené.

Z hlediska potenciálu pro široké nasazení a využívání v řadě oblastí mají nespornou výhodu plavidla kategorie mikro ROV s hmotností 3 až 20 kg. Mezi jejich hlavní výhody patří nízké pořizovací a provozní náklady, snadná manipulace (nevyžadují speciální vypouštěcí zařízení a naviják jako větší modely).

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. V současné době aplikace této třídy ROV spočívá téměř výhradně v inspekčních / observačních operacích. Jen výjimečně jsou tyto ROV vybaveny i malými manipulatory. 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. V případě mikro ROV tvoří kabel významný příspěvek k hydrodynamickému odporu celého plavidla. Snahu o použití vodičů s minimální průřezovou plochou však limituje maximální délka kabelu, kterou lze v závislosti na požadavcích napájení použít.

1.1 – 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/LiPol baterie, mikrokontrolery a jedno deskové počítače, CCTV kamery případně další senzory, dovolují seriózně pomýšlet nad realizací i tak komplexních konstrukčních projektů jako je ROV v režimu DIY tj. na úrovni jednotlivce “technologického kutila” nebo komunity i 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.

Největším přínosem jsou vlastní zkušenosti konstrukčního týmu z vývoje a testováním vývojové řady robotických ponorek ROV V1.0-1.2

1.2 – Záměry a cíle projektu

Cílem tohoto projektu bylo na základě předchozích zkušeností z let 2021-2023 navrhnout a postavit pokročilé mikro ROV unikátní koncepce pro malé a střední hloubky (<800m) vhodné svojí univerzálností a přizpůsobitelností pro výzkum širokého spektra extrémních prostředí.

V rámci projektu byl proveden průzkum mezi potenciálními i zkušenými uživateli a obsáhlá rešerše literatury z oboru (Přílohy 1 a 2), abychom definovaly koncepční a konstrukční požadavky na naše ROV.

1.3 – Potřeby uživatelů

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

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

Prof. RNDr. Zdeněk Ďuriš, CSc. (OSU)

RNDr. Jana Kvíderová Ph.D. (Botanický ústav AV ČR)

Mgr. Zuzana Musilová Ph.D. (PřF UK)

PaedDr. Josef Velfl (Hornické muzeum Příbram)

Mgr. Barbora Winterová (Masarykova univerzita Brno)

Ivan Rous (Severočeské muzeum Liberec)

Výsledkem těchto konzultací jsou níže uvedené systémové požadavky (1.4) a návrh odběrových zařízení (3.13).

Potřeby vědeckého výzkumu a ochrany přírody zahrnovali následující aplikace:

- 1) výzkum řas pod ledovou pokrývkou v Antarktidě
- 2) zatopených rudných dolů v Příbrami,
- 3) výzkum hlubokomořských ryb nebo krevet v mezopelagiálu (v hloubkách 200 – 100m)
- 3) mapování společenstev korálových útesů
- 4) 3D snímkování vraků z 2. světové války.

Společným požadavkem na mikro ROV bylo aby se jednalo o prostředek snadno ovladatelný, přenosný, bezpečný a spolehlivý a zároveň i dostatečně levný tj. cenově dostupný i pro neziskové organizace působící v rozvojovém světě.

Na základě

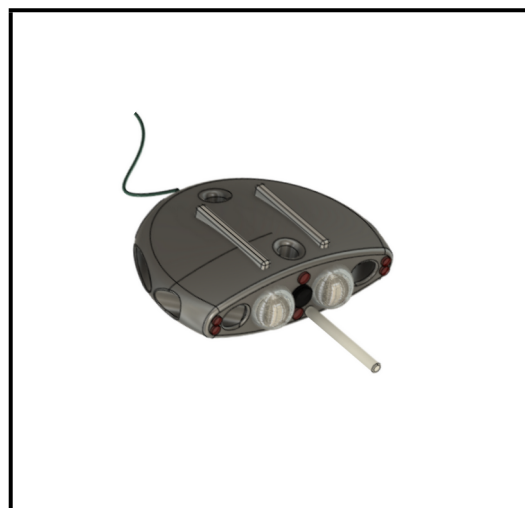
- a) zkušeností z testování ROV V1.0. - V1.2 s otevřeným rámem
- b) výše uvedených uživatelských požadavků
- c) provedeního šetření technologických omezení současných mikro ROV jsme navrhli a postavili zcela novou robotickou ponorku ROV V2 vyznačující se
 - a) vysokou modulárností a konfigurovatelností– plavidlo umožňuje integraci rozšiřujících bateriových, navigačních, odběrových a měřících modulů dle povahy jeho mise
 - b) špičkovými hydrodynamickými vlastnostmi - kvůli minimalizaci vlivu proudění
 - c) vysokorychlostním spojením po tenkém optickém kabelu – pro minimalizaci zpoždění záběrů z kamer a snížení hydrodynamického odporu.

Díky zvolenému způsobu komunikace a řešení tlakového tělesa ROV 2.0 dosahujeme oproti ROV 1.2. 3x vyšší hloubkou ponoření, 2x delší operační dobou a dálkovým dosahem.

ROV 2.0 je dále vyvíjena k využití pro občanskou vědu a výuku v Techneciu tak i pro vzdělávací, výzkumné a ochranné účely ve spolupráci s odbornými pracovišti VŠ, AV ČR a dalšími partnery.



Obr. 1: Open frame ROV 1.1.



Obr. 2: Hydrodynamický hybrid-frame ROV2.0

V rámci našeho šetření, se nám nepodařilo identifikovat v ČR pracoviště, která by se systematicky podobnému výzkumu a vývoji ROV věnovala, z tohoto důvodu plánujeme rozvoj zahraniční spolupráce v rámci testování naší ponorky, konkrétně s týmem na univerzitě v polské Gdyni.

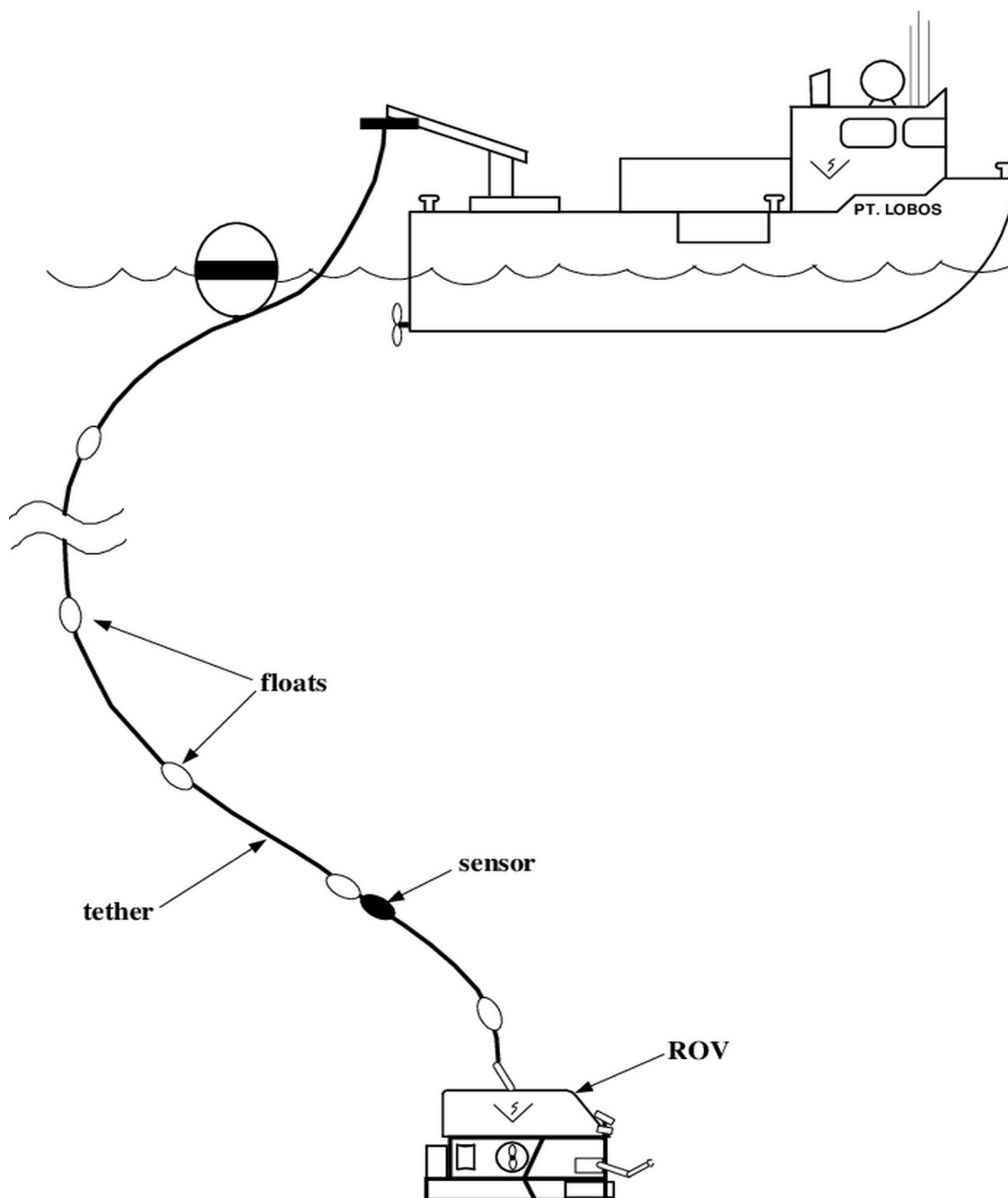
1.4 – Systémové požadavky

Tab. 1: Systémové požadavky na ROV 2.0

	cíl
Cena	< 36000 Kč (1 500 \$)
Rozměry	Celé ROV se vejde do kufru osobního automobilu (200, 500, 500 mm)
hmotnost	~ 10 kg
Množství potřebných lidí k transportu a uvedení do chodu	2 lidi
Hloubka	min. 300m (optimum 600-800m)
Výdrž baterie	> 5h
Vztlak zařízení	neutrální
Komunikace	nízké zpoždění přenosu <100ms
Kamera	kontrola zoomu a ostření
Senzory	Hloubka, teplota, IMU, vodivost, turbidita
Čas příprav	5 min
Ovládání	Jednoduché, robustní
Použité komponenty	Dobře dostupné
Uchycení rozšiř. modulů	Lyžiny na spodní a vrchní straně
Výrobní náročnost	Jednoduchá
Použití	Hydrobiologie, hydrogeologie, podvodní archeologie

Kapitola 2 – ROV, systémová úroveň

Nasazení ROV na moři předpokládá integraci několika funkčních celků, jak naznačuje obrázek níže.

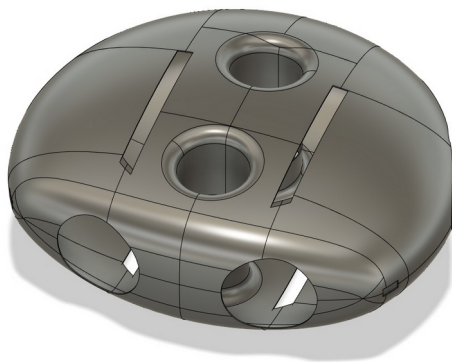


Obr. 3: Schéma pracovního nasazení ROV (převzato z: researchgate.net)

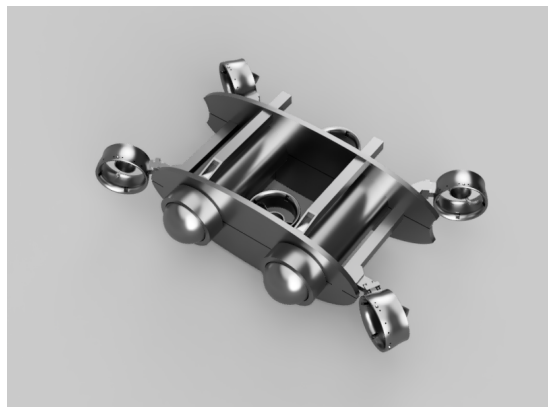
V rámci této práce se soustředíme primárně systémy týkající se vlastního ROV a jejich inovací.

Přehled systémů

Naše ROV se skládá z mechanické a elektronické části. Do mechanické části patří tlakový trup, vztlaková tělesa, nosný rám, případně hydrodynamický kryt a thrusterly.



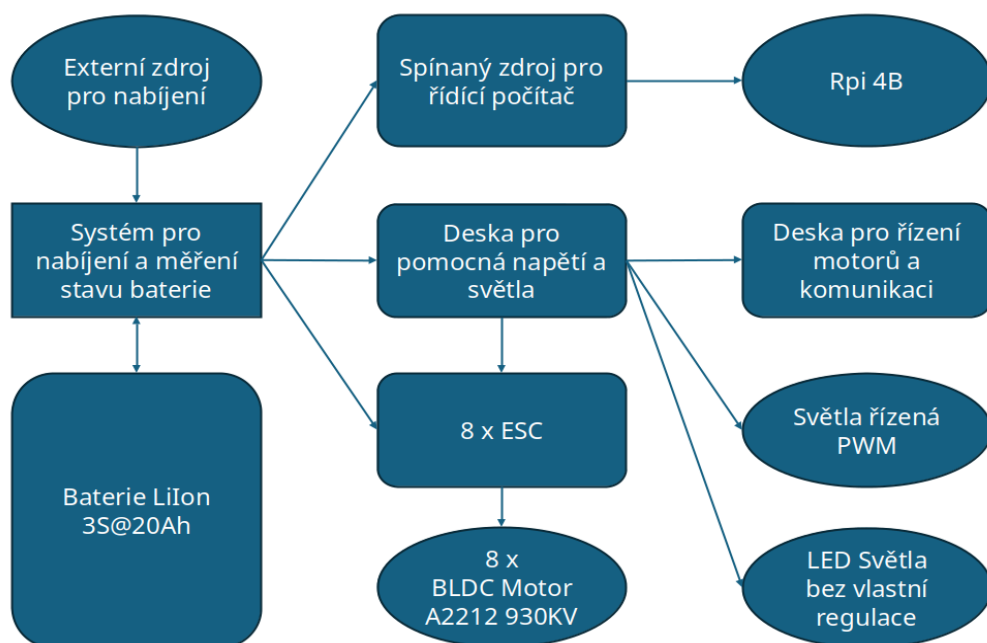
Obr. 4: Hydrodynamický kryt



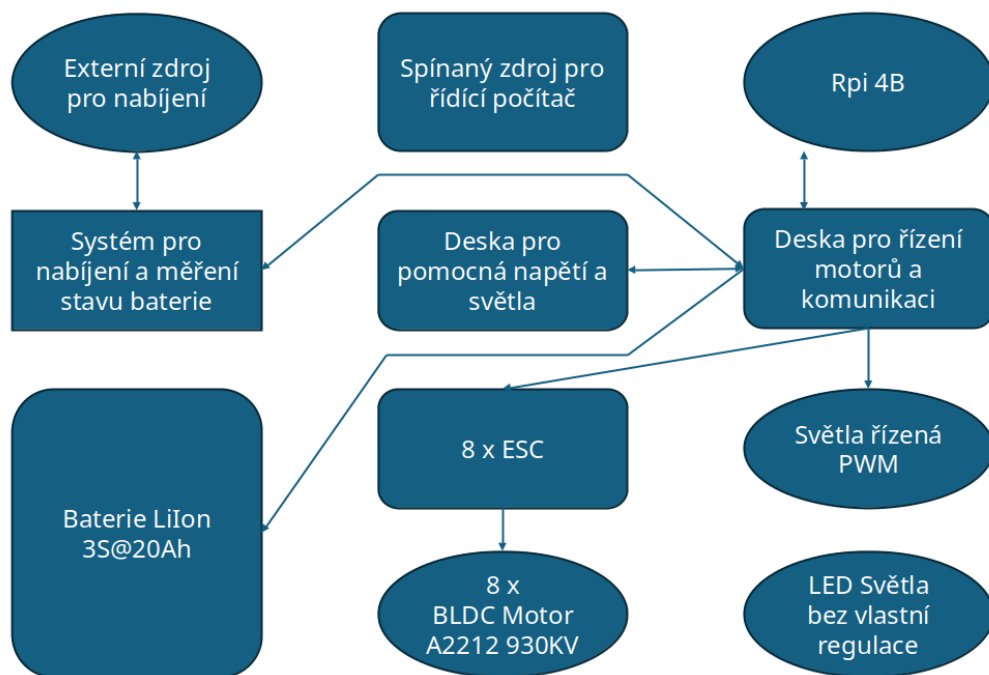
Obr. 5: Nosný rám

Do elektronické části patří napájení, motory, světla, komunikace, řídicí jednotka, kamery a senzory.

Schéma zapojení elektroniky



Obr. 6: Blokové schéma napájení elektroniky



Obr. 7: Blokové schéma komunikace uvnitř ROV

Kapitola 3 – Dílčí subsystémy a jejich vývoj

3.1 – Plováky

Plováky slouží k dosažení neutrálního vztlaku. Jejich vztlak by se neměl výrazně měnit z operační hloubkou ROV.

3.1.1 – Požadavky

Po plovácích požadujeme nízkou hmotnost vzhledem k objemu, přijatelnou cenu, kontrolu nad kvalitou výrobku.

Pro naše účely dostupné materiály:

Tab. 3: Materiály na výrobu a výplň plováků

	Materiály na plášť plováků			Syntetická pěna	Materiály pro výplň plováků		
	Hliník	HDPE	PVC		Pěna	Minerální olej	Skleněné / keramické sféry
Plusy	Pevný	Lehký	Lehký	Nestlačitelná	Zvyšuje pevnost	Nestlačitelný	Lehký
			Lepitelný	může být použita na konstrukci			Netoxický
Mínusy	Těžký	Špatně lepitelný	Méně pevný	nutnost utěsnit proti nasáknutí vodou	Obtížná kontrola kvality výplně	Těžký	Výrobní náročnost
	Obtížně svařitelný	Méně pevný					(cena)

Zvolené řešení

Pro ROV 2 jsme se rozhodli pro využití tvrzeného polystyrenu za laminovaného proti vniknutí vody epoxidovou pryskyřicí (do 150 m). pro hlubší ponory vyvíjíme kompozitní materiál s dutých skleněných kuliček zalitých v epoxidové nebo polyuretanové pryskyřici

3.2 – Rám a trup

Rám je určen ke spojení jednotlivých součástí dohromady. Rozlišujeme otevřený rám a uzavřený – de facto vnější (obvykle) hydrodynamický trup. Mezi výhody uzavřeného trupu patří – možnost dosáhnout lepších hydrodynamických vlastností, hladký uzavřený trup je také méně náchylný k tomu zachytit okolní chaluhy, rybářské sítě atp.. Oproti otevřenému rámu má uzavřený rám blíže působíště vztlaku a těžiště, což umožňuje vyšší volnost v pohybu. Výhodou otevřeného rámu je mnohem větší variabilita z hlediska uchycení různých doplňkových zařízení atp.

Tab. 2: Porovnání otevřeného a uzavřeného rámu

Otevřený rám	Uzavřený rám
Výhody: Možnost snadného upevnění přídatných zařízení v závislosti na misi ROV Jednodušší návrh rámu	Výhody: Nižší hydrodynamický odpor
Nevýhody: Větší hydrodynamický odpor	Nevýhody: Obtížnější modifikovatelnost Složitý návrh tvaru

Na základě zkušeností z testování a nasazení vývojové řady ROV V1.0 – V1.2, které mají konstrukci open frame. Jsme rozhodli, že se v rámci dalšího vývoje OV 2.0 pokusíme zkombinovat výhody obou konceptů tj. Lepší hydrodynamický tvar uzavřeného trupu a flexibilitou otevřeného rámu. Vytvořili jsme design, který kombinuje nízký hydrodynamický odpor s možností flexibilně přidávat na ROV další externí zařízení v závislosti na povaze jeho mise. K tomu slouží 4 montážní lyžiny umístěné zároveň s povrchem vnějšího pláště ROV. Tyto lyžiny slouží také jako strukturní prvek celé kostry ROV.

Požadavky

Konstrukce trupu / rámu musí mít dostatečnou pevnost a umožňovat montáž přídatného vybavení v závislosti na povaze mise ROV.

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. 3: Materiály na výrobu rámu a hydrodynamického krytu pro ROV

	Hliník	HDPE	PVC	3D tisknutý PLA/PETG
Plusy	Pevný	Lehký	lehké	lehký
	Populární	Snadno opracovatelný	levné	Možnost tisku složitějších tvarů
	Cenově dostupný		snadno opracovatelné	
			Lepitelné a pevné	
Minusy	Svařování je náročné	Nepříliš pevné	Relativně nejnižší odolnost, nicméně dostačující	Křehkost, Nutno zesílit laminací
	Těžký v porovnání s HDPE nebo PVC	Dražší než hliník		
	Voděodolné sváry jsou obtížné	Obtížně lepitelné		
	možnost koroze			

Zvolené řešení

Z výše uvedených možností jsme se rozhodli pro řešení hybridní řešení spojující výhody uzavřeného hydrodynamicky tvarovaného trupu opatřeného na spodní a horní straně několika montážními lyžinami, které zároveň působí jako strukturní element . Příčné přepážky mají také dvojí funkci a fungují nejen jako nosné prvky ale i plováky.



Obr. 8: Nosný rám ROV V2.0

3.3 – Tlakový trup

ROV 2 se skládá ze dvou tlakových trupů. Každý z nich má několik částí: čelní průzor pro kamery, plášť s přírubami pro snadné uchycení a kabelové průchodky, která nám umožňuje průchod kabelů z vodotěsné gondoly k motorům, senzorům a komunikaci s pozemní stanicí

Požadavky

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

Materiály pro tlakový trup

Z hlediska zajištění tlakové odolnosti trupu máme dvě možnosti:

- 1) použít lehký trup a beze zbytku jej vyplnit nestlačitelným materiálem.
- 2) použít těžší tlakuvzdorný trup podobně jako u klasického ROV.

Tab. 4: Možnosti řešení tlakového trupu

	Ad1) Minerální olej	Ad1) Vylití polymerem	Ad2) Vyplnění vzduchem
Plusy	Nejběžnější způsob těsnění	Druhý nejčastější způsob těsnění	Snadná obsluha
	Minimální nároky na pevnost trupu	Jistota že těsní	možnost úprav vnitřní elektroniky
Mínusy	Náročné opravy	Náročné opravy	méně robustní proti vzniku netěsnosti
	Vyšší cena	Vyšší cena	

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 vlastní optiky 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 zvážení 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. 5: Materiály pro tlakový trup

	Hliníkové slitiny	Plast	Laminát – Kompozit
Výhody	Cena	Nízká cena, dostupnost	Pevnost
	Pevnost	Snadná zpracovatelnost	Nízká hmotnost
	Tepelná vodivost		
Nevýhody		Nižší pevnost, méně vhodné do hloubek > 100 m	Cena
		Výraznější změna vlastností se změnou teploty než u kovu, rychlejší únava materiálu	Složitá výroba, riziko defektů
			náročné provedení oprav

Tab. 6: Parametry použitých hliníkových slitin (alupa.cz, upraveno)

Mechanické a technologické vlastnosti nabízených slitin hliníku

Označení dle EN AW	Označení dle	Chemické složení	Stav materiálu	Pevnost v tahu Rm (Mpa)	Mez kluzu min. Rp (Mpa)	Tažnost A% min.	Korozní odolnost	Svařitelnost	Obrobitelnost
6060	42 4401	AlMgSi	T6	190	150	8	velmi dobrá	velmi dobrá	přijatelná
			T66	min. 215	160	8			

V našem případě jsme se rozhodli, že použijeme tlakový trup vyplněný 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 úpravami 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.

Kabelové průchodky

Pro řešení Kabelové průchodky jsou řešeny pomocí tzv. kabelových penetrátorů (dutých šroubů) které procházejí tlakovým víkem gondoly a, ve kterých jsou kabely zalité zalévací hmotou. Vodotěsný spoj je zajištěn pomocí o-kroužku a dotažením samotného penetrátoru k zadnímu víku. Pro zalití kabelů do penetrátorů testujeme vhodné epoxidy a polyuretany.



Obr. 9: Schematické znázornění penetrátoru (rovmaker.com, upraveno)

Zvolené řešení

Z důvodu úspory času jsme se rozhodli pro koupi již hotového tlakového trupu včetně průzorů a součástí kabelové průchodky. S ohledem na velikost vnitřního prostoru jsme se rozhodli že ROV se bude skládat ze dvou tlakových trupů, kdy v každém z trupů bude obdobná elektronika.

Pro relativně tenkostěnný tlakový trup válcového průřezu jako má naše ROV připadá v úvahu imploze v důsledku tzv. elastické zhroucení. Odhad mezního tlaku - tlakové odolnosti ROV - můžeme vypočítat podle níže uvedené rovnice pro tlaková potrubí užívaná např. v ropném průmyslu. (drillingformulas.com).

D – průměr trubky

t – tloušťka stěny

$$\frac{D}{t} > \pm 25 \quad P_E = \frac{46.95 * 10^6}{\frac{D}{t} * \left(\frac{D}{t} - 1 \right)^2}$$

Dalším zdrojem inspirace pro naše výpočty pevnosti trupu byla také publikace Roark's Formulas for Stress and Strain @ jackson.engr.tamu.edu.

Takto získané odhady jsou v rámcovém souladu s údaji od dodavatele hliníkových dílů a optických průzorů. Na základě těchto informací se domníváme, že bezpečná operační hloubka stávající tlakového trupu je 300 m.

Do budoucna plánujeme provést podrobné výpočty a simulace také v programu Ansys, zejména v souvislosti s vývojem trupu pro hloubky až 800m.

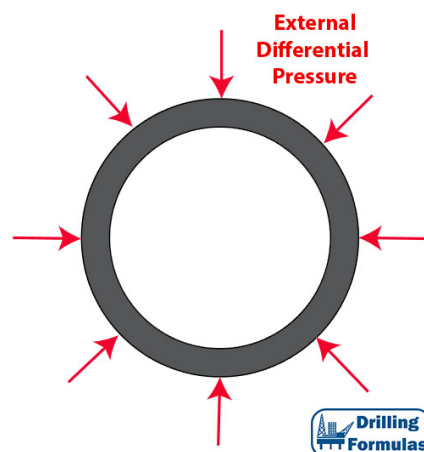
3.4 – Napájení

Napájení se stará o dodávku elektrické energie pro jednotlivé systémy ROV.

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

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



Obr. 10: Působení vnějšího tlaku na trubku (drillingformulas.com)



Obr. 11: Vzhled ROV V2.0

Tab. 7: 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	Nutnost na hladině zajistit vhodný zdroj pro napájení ROV (takové zdroje jsou drahé)	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		

Zvolené řešení

Pro napájení naší ROV používáme akumulátory technologie LiIon z důvodu hustoty energie. Akumulátor jsme si poskládali sami z článků rozměru 18650. Díky tomu jsme schopni lepšího využití místa v trupu. Pro ještě lepší využití místa v trupu jsme do prostoru mezi šestiúhelníkem, do kterého jsou poskládány baterie, a tlakové těleso umístili obvody ESC (více v 3.5).

3.5 – Motorizace

Požadavky

Elektrické motory musí zajistit přesné řízení ROV na základě instrukcí řídicího počítače v širokém rozsahu hloubek, 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.

Při použití elektromotorů, se nabízejí následující volby

Tab. 8: Možnosti motorizace

	DC motory („mechanicky komutované“)	BLDC motory (střídavé synchronní)
Výhody	Jednoduchá regulace výkonu (PWM)	Přesné řízení otáček pomocí ESC řízené komutací
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. 9: Možnosti ESC

	EZRUN 18 A	ZMR 20 A Bidirectional Brushless ESC	STEVAL-ESC001V1
Výhody	Lepší chladič	Cena	Přesné řízení
		Vyšší proudová zatěžovatelnost	Možnost přeprogramovat firmware dle potřeby
Nevýhody	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.

Zvolené řešení

Jako motor jsme vybrali BLDC motor s označením A2212 930KV a ESC ZMR 20 Toto ESC má několik užitečných vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří absence možnosti nastavovat vnitřní proměnné, rychlejší reakce na změnu řídicího signálu, toto je vykoupeno nutností generace přesnějšího PWM signálu (nelze generovat pomocí SW).

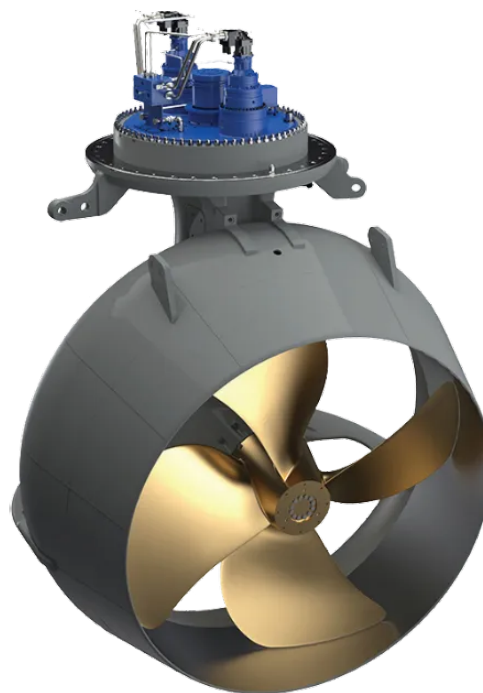
Zkušební ukázali, že BLDC motory není zapotřebí utěšňovat proti vodě. Ochranný lak, který je na vinutí motorů z výroby je pro naše potřeby dostačující.

3.6 – Thrustery

Thruster tvoří obvykle lodní vrtule nebo tryska vytvářející tah (thrust). Požadavky

Požadavkem na thrustery je, aby měli co nejvyšší účinnost v rozmezí běžné operační rychlosti ROV tj. 0 až 2.5 ms⁻¹. Krouťivý moment k jejich otáčení nesmí překročit mez, kterou poskytne motor s danou elektronikou, zároveň thruster musí poskytovat dostatek tahu k pohybu ponorky v obou směrech. (výkon motoru je nezávislý na směru otáčení)

Vedle lodních šrouby jsou nejčastěji používaným druhem thrusterů Kortova nebo Riceova tryska (liší se profilem dýzy) nebo pumpjety, které se skládají z trysky a kormidel pro vektorování tahu.



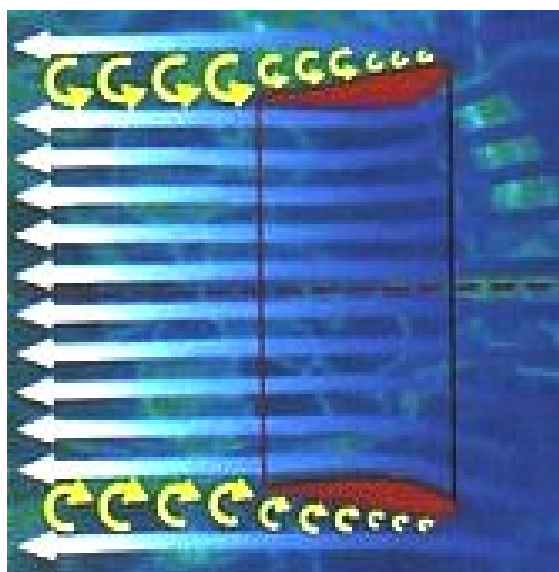
Obr. 12: Vizualizace velkého lodního thrustru (wartsila.com)

Tab. 10: Možnosti thrusterů

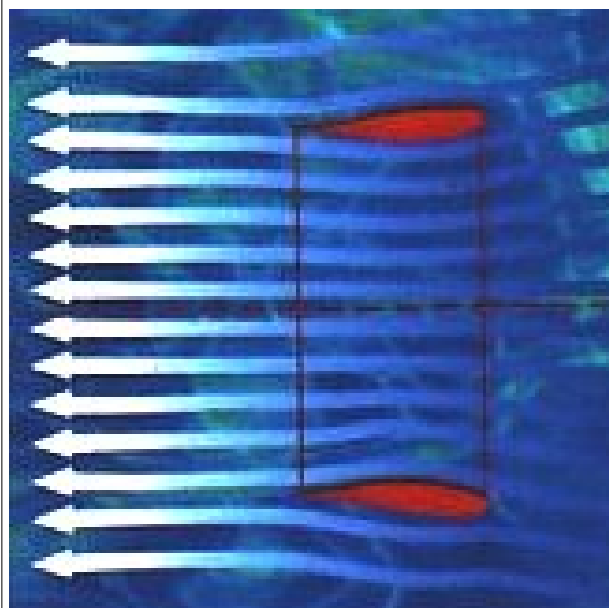
	lodní šroub	Kortova / Riceova tryska	Pump – Jet – Kortova / Riceova tryska s možností vektorování tahu
Plusy	na trhu dostupný	Vysoká účinnost v malých rychlostech	dobrá účinnost ve vyšších rychlostech proudění / hodnotách tahu
Minusy	nízká účinnost	Nízký tah cena	složitost

Tab. 11: Námi testované thrustery

	koupené	DIY Verze A	DIY verze B
		Lehké	3D tisknutelné
plusy	Žádné časové náklady na vývoj	3D tisknutelné	Mechanicky pevnější
		Při provozu vznikaly vibrace	
Mínusy	Nízká kvalita čínských výrobků	Špatně řešené uchycení motorů a Kortovy trysky	



Obr. 1: Kortova tryska při rychlostech ~10 uzlů (solarnavigator.net)



Obr. 2: Riceova tryska při rychlostech ~10 uzlů (solarnavigator.net)

Zvolené řešení

Pro pohon ROV 2.0 jsme osvědčené thrustery z ROV 1.2, které mají tah až ~2,5 kg v malých rychlostech. Uchycení je koncipováno zcela nové.



Obr. 13: Truster pro ROV V2.0 včetně mechanismu pro uchycení

3.7 – Kamerový systém

Kamerový systém má klíčový význam neboť umožňuje operátorovi získávat a přenášet vizuální informace o prostředí, ve kterém se ROV pohybuje. Požadavkem na kamerový systém je nízká latence, velké rozlišení a vysoká světelnost. Výběru vhodné kamery je třeba věnovat dostatek času. Největším omezením při výběru je požadavek na kvalitní obraz i při nízkém osvětlení a nízká latence obrazu.

Tab. 12: Vyzkoušené kamery

	IMX 307	IMX291	RPi CAM V3 (IMX708)	RPi HQ CAM (IMX477)	IMX462
Rozlišení	2Mpx	2Mpx	12Mpx	12Mpx	2Mpx
Plusy	Cena, Dobrá světelnost	Světelnost	Velikost, verze bez IR filtru, automatické ostření, autofokus	Velikost čipu	Světelnost
Mínusy	Framerate jen 30 fps	Přenosová rychlost / latence USB 2.0		Jen průměrná světelnost (vyžadují dosvěcování)	Zatím jsme na žádné nepřišli

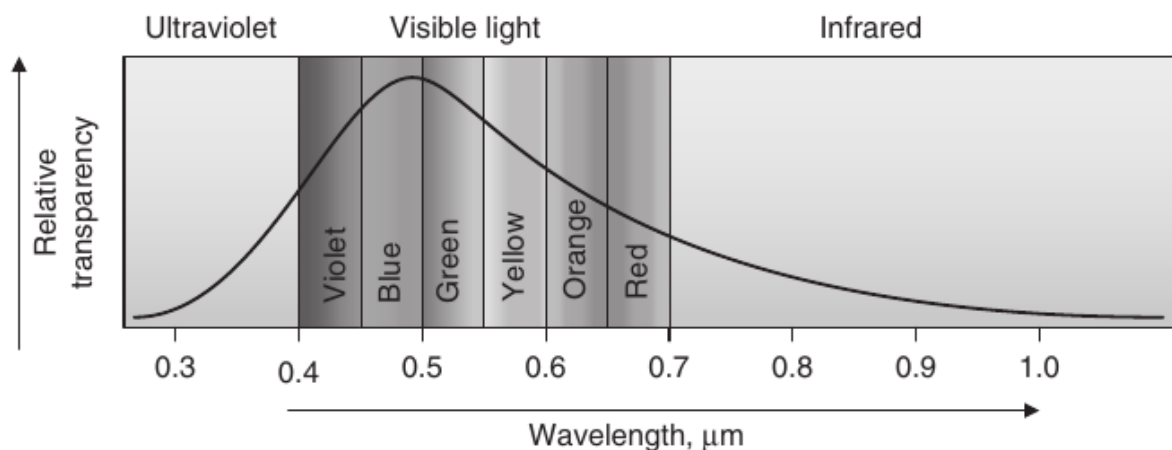
Všechny čipy IMX vyvinula a vyrábí společnost Sony

Z výše uvedených kamer se nám na základě provedených testů jeví jako použitelné pro potřeby řízení ROV a snímání RPi HQ CAM a nejnovější RPi V3. Obě umožňují vysokorychlostní připojení přes MIPI CSI rozhraní k PŘI 4B. Nejnovějším vylepšením kamerového systému ROV 2.0 jsou dvě kamery s čipem Sony IMX 291 a respektive IMX462, které mají oproti výše uvedeným RPi kamerám sice nižší rozlišení, ale zato mají mnohem vyšší velikost pixelů, což má za následek několikanásobně vyšší světelnou citlivost a dynamický rozsah. Tyto kamery dávají možnost používat světla o nižším světelném výkonu a tak částečně eliminovat rušivý zpětný rozptyl

světla, který komplikuje snímání mořské fauny a flory atp. Spolu s nimi testujeme i novou IP kameru na bázi IMX 307 od které si slibujeme až 2x nižší latenci ve srovnání s výše uvedeným řešením na bázi RPi 4B.

3.8 – Osvětlení

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.



Obr. 3: průsvitnost v jednotlivých vlnových délkách (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 177)

Požadavky

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

Zde se nabízejí v podstatě jen dvě možnosti:

- Koupit světla určená přímo pro ROV.
- Postavit světla vlastní konstrukce.

Zvolené řešení

Na základě testů různých řešení (v rámci vývoje ROV 1.0 - 1.2) jsme se pro ROV 2.0 rozhodli použít kombinaci sady základních bílých světel (dodaných výrobcem světel pro ROV), s možností regulace výkonu pomocí PWM signálu a multispektrálních LED světel vlastní konstrukce umožňujících osvit/přísvit také v oblasti UV a NIR. Díky tomu můžeme pomocí ROV2 provádět unikátní pozorování a měření (inspirované technologiemi leteckého a satelitního dálkového průzkumu Země DPZ), které jsou pro většinu současných ROV nedostupné.



Obr. 14: Komerčně prodávané bílé světlo

3.9 – Komunikace

V rámci vývoje našich robotických ponorek jsme vyzkoušeli celou řadu různých komunikačních protokolů, mezi něž patří: RS232, RS485, CANBUS, FPV, ale žádný z nich zcela nevyhovoval našim požadavkům. V případě ROV 1.0 - 1.2 jsme se rozhodli, vzhledem k jeho dostupnosti a portabilitě, používat ethernetový protokol.

S ohledem na sílící požadavky na zvýšení operační hloubky a dálkového dosahu ROV 2.0 jsme se rozhodli pro použití jednovidového optického kabelu se 4 optickými pasivními vlákny.. Optický kabel se připojuje do vysílače/přijímače, který se připojuje do SFP+ portu, jelikož náš řídicí počítač tímto portem nedisponuje je nutné použít převodník mezi SFP+ a RJ45, kterým již disponuje.

Optické kabely jsou schopny přenášet informace na velmi velké vzdálenosti a tak se nemusíme obávat, že bychom překročili maximální možnou délku. Další z výhod tohoto řešení je, že se vyrábí kabely, které jsou samonosné, tzn. navrženy na natažení mezi sloupy vysokého napětí. Tyto kabely mohou být namáhány až 1kN bez jejich poškození. Díky tomu není zapotřebí táhnout za ponorkou další mechanické spojení.

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

```

20 address = 'tcp://192.168.10.83:5555'
21 connected = False
22 sender = sender_start(address)
23
24 picam = VideoStream(usePiCamera=True, resolution=(640, 480)).start()
25 time.sleep(2.0) # allow camera sensor to warm up
26 while True: # send images as stream until Ctrl-C
27     image = picam.read()
28     try:
29         sender.send_image('submarine', image)
30         if not connected:
31             connected = True
32             print("Connected!")
33     except (zmq.ZMQError, zmq.ContextTerminated, zmq.Again):
34         print("Trying to connect camera stream...")
35         if 'sender' in locals():
36             sender.close()
37             sleep(1)
38         sender = sender_start(address)

```

Obr. 4: Část programu zajišťujícího přenos obrazu

Mechanické upevnění

Komunikační kabel je k ponorce mechanicky připevněn tak, aby se žádná síla působící na něj nepřenesla na vodotěsnou průchodku.

Zvolené řešení

Pro komunikaci používáme protokoly TCP/IPv4 a UDP. Protokol TCP nám umožňuje využívat vzdálenou SSH konzoli pro správu řídicí jednotky.

3.10 – Řídicí jednotka

Řídicí 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 ethernet MIPI CSI pro připojení vybraných kamer a I²C nebo SPI komunikační rozhraní pro komunikaci s mikroprocesory řídicí motory, světla a vyčítání ze senzorů.

Tab. 13: Vhodné SBC pro konstrukci řídicího počítače

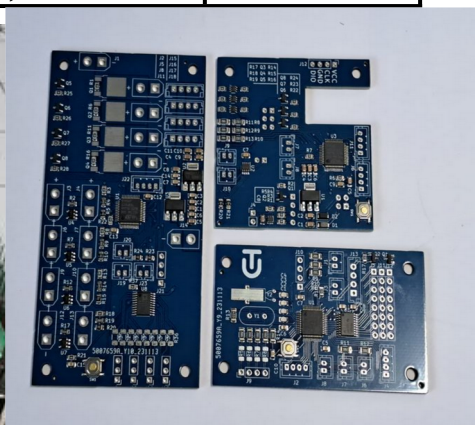
	RPi 3B+	RPi 4B	RPi 5	Jetson
Počet výpočetních jader	4	4	4	4
Pracovní frekvence jádra [GHz]	1,4	1,8	2,4	1,4
RAM [GB]	1	1,2,4,8	4,8	4,8,16,32
Rychlost připojení [Mbps]	100	1000	1000	1000
Komunikační rozhraní	4*USB 2.0 MIPI CSI	2*USB 2.0 2*USB 3.0 MIPI CSI	2*USB 2.0 2*USB 3.0 2*MIPI CSI	4*USB 3.0 2*MIPI CSI
Spotřeba energie	1,5W	4W	2,5 - 7W	5W



Obr. 15: Porovnání velikosti NVIDIA JetsonNANO s RaspberryPi 3B+ (www.arrov.com, upraveno)

Aktuální verze ROV 2.0 pracuje s RPi 4B. Další variantou je Jetson Nano, respektive Rpi 5 které navíc disponují dvěma vstupy pro kamery s MIPI CSI. Výhodou RPi 5 oproti JetsonNano je menší formfaktor. V případě aplikací náročných na zpracování obrazu (multispektrální nebo stereo snímání) je naopak výhodnější Jetson Nano, který poskytuje vyšší grafický výkon.

Vzhledem k tomu že aktuálně používané Raspberry PI 4B ani uvažovaná vylepšení v podobě (jetson Nano, RPi 5) nedisponují všemi potřebnými perifériemi jsme navrhli desky s mikroprocesorem STM32F030Cx. Tyto desky dodají Rpi 4B všechny potřebné funkcionality. Výběr mikroprocesoru byl ovlivněn skutečností, že tyto mikroprocesory programují. Námi navržené desky umožňují připojovat a odpojovat jednotlivá zařízení od napájení, pro případ, že v danou chvíli nejsou zapotřebí. Tím můžeme ušetřit část energie, kterou můžeme využít později.



Obr. 16: Námi navržené desky pro rozšíření funkcí řídicího počítače

3.11 – Senzory

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

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

Zvolené řešení

Teplotní čidlo pro měření okolí jsem vybral 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 30 bar(MS5837-30BA26). Pro měření teploty uvnitř používáme také DS18B20. Pro měření vlhkosti vyvíjíme vlastní velkoplošný senzor, který okamžitě detekuje průsak vody do trupu. Dále jsme přidali USB hydrofon pro monitorování podmořského života, tak i vlastního hluku (případné kavitace vrtulí, buzení motorů atp.).

3.12 – Řídící stanice operátora

Požadavky

Řídící stanice slouží k monitorování pohybu a stavu ROV a ovládání jednotlivých periférií a manuálnímu ovládání pohybu a světel. Komunikace optickým kabelem vede data oběma směry s co nejnížší 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
 1. Stream s minimální latencí. Rozhraní umožňuje přepínat mezi aktivními kamerami, spustit záznam a pořídit snímek, upravovat parametry expozice.
2. Polohu ROV
 1. 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
 1. 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.

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 jednoduší a plynulejší ovládání všech funkcí ROV.

Řešení ovládacího 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 světla, odběrové zařízení) a zaslány (cca 30x za vteřinu) pomocí knihovny Zero-MQ přes protokol TCP/IP datovým 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 ROV a operátora / chyba komunikace palubních systémů ROV, 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 světla a odběrového zařízení. Pro účely grafického rozhraní byla vytvořena nadstavba knihovny pygame pro usnadnění tvorby potřebných widgetů.

```

451     def key(self, *keydictset):
452         keys = self.pygame.key.get_pressed()
453         for keydict in keydictset:
454             validkey = None
455
456             for keyset in keydict.keys():
457                 pressed = True
458                 for keyname in keyset:
459                     if not keys[self.pygame.key.key_code(keyname)]:
460                         pressed = False
461
462                 if pressed and validkey != 0:
463                     if validkey:
464                         validkey = 0
465                     else:
466                         validkey = keyset
467             if validkey:
468                 keydict[validkey]()

```

Obr. 5: Funkce řídicího programu sloužící k vyčítání z klávesnice operátora

Řešení přenosu obrazu

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

3.13 – Odběrová zařízení

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 chytnout kus rostliny a za pomoci motorů ponorky tento kus utrhnout 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.

Mechanický manipulátor

Pro odběrové zařízení jsme navrhli jednoduché 3D tištěné mechanické kleště, které umožňují připevnit např. břity pro odstrižení vzorku. Kleště jsme umístili do dolní části zorného pole kamery.

Vedle kleští je umístěna nasávací hadice odběrového zařízení

Nasávací zařízení pro odběr vzorků s filtrem

Odběrové zařízení s filtrem nám dovoluje nasát ustřižený vzorek do filtračního koše odběrového zařízení (vysavače).. Koš vysavače je složen z nádoby, ve které je nerezové síto, případně dle mise umožňuje vložení i jemnějších tzv. uhelových sít na odběr planktonu, přes které PWM řízená odstředivá pumpa nasává vodu a tím vytváří v odběrovém koši potřebný podtlak k nasátí vzorků.

Odběrové zařízení na vzorky vody pro chemickou analýzu

testujeme jednoduché odběrové zařízení na chemickou analýzu vody na bázi injekčních stříkaček.

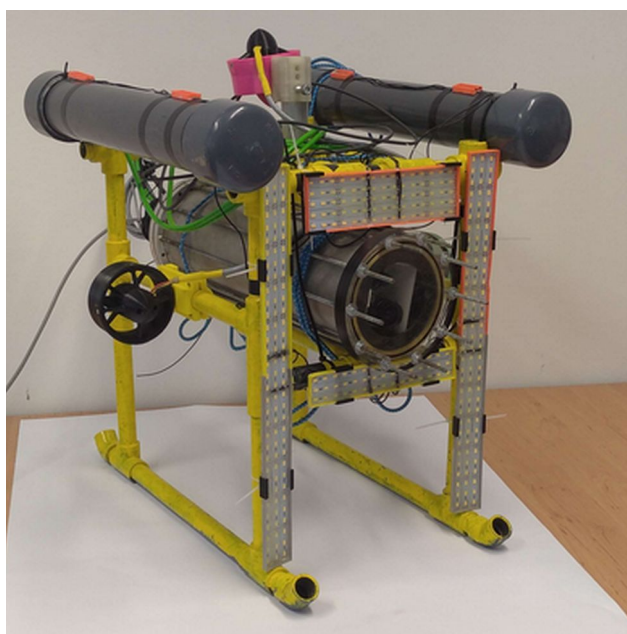
Kapitola 4 – Integrace systému, testy a výsledky.

4.1 – Integrace

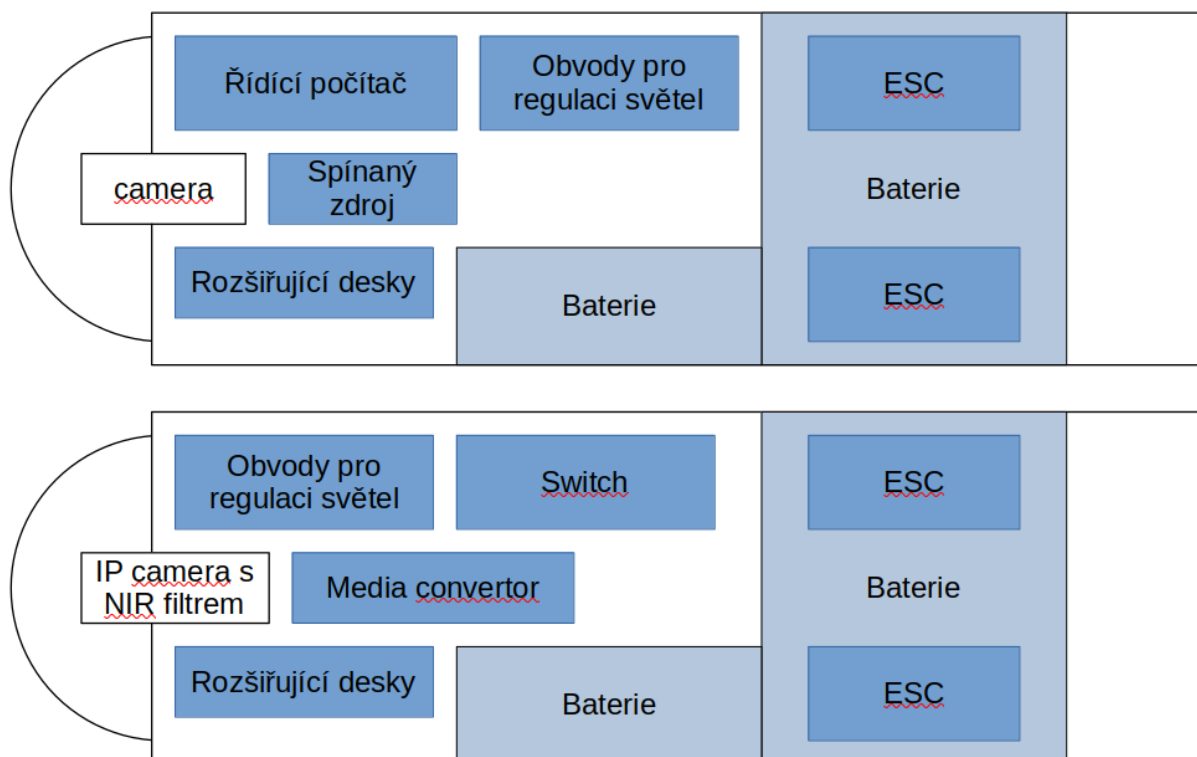
Elektroniku pro ROV jsme úspěšně otestovali na podzim roku 2023 při expedici v Chorvatsku na ROV V1.2. Při testování jsme identifikovali některé firmwarové nedostatky týkající se ovládání světel a hnacích motorů, zejména jejich nízké odolnosti proti rušení (příjmu poškozených instrukcí), které jsme dalším vývojem opravili.



Obr. 6: Výkreslení ROV v modelovacím programu



Obr. 7: Fotografie skutečného ROV



Obr. 17: Rozmístění elektroniky v trupech ROV V2.0

4.2 – Testovací ponory

Klíčové elektronické komponenty a elektromechanická zařízení jsme testovali integrované na ROV 1.2. jednak ve sladkých vodách (Slapy, července - srpen 2023) a poté i v rámci expedice za mořskou biologií středomoří v Chorvatsku 2023 (září - říjen 2023).

Tab. 14: Realizované testovací ponory v rámci vývoje technologií pro ROV 2.0

Číslo ponoru	Verze	Datum	Lokalita	délka	hloubka
10	1.1_c	12.3.2023	JHV	20min	3,5m
11	1.2	18.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	15 min	80 m
12	1.2	18.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	5 min	60 m
13	1.2	19.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	10 min	40 m
14	1.2	21.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	25 min	12 m
15	Samostatně	22.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	5 min	0,6 m
16	Samostatně	23.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	3 min	1 m
17	1.2	26.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	25 min	16 m
18	1.2	27.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	30 min	6 m
19	1.2	30.9.2023	Žuljana, Chorvatsko	5 min	2 m

Tab. 15: Provedené testy technologií pro ROV 2.0 v rámci testovacích ponorů

Číslo ponoru	Verze	Cíle testu	Pozn.
10	1.1_c	Test světél vlastní konstrukce	
11	1.2	Test vodotěsnosti tlakového tělesa	
12	1.2	Test tlakové odolnosti plováků (PVC)	Imploze jednoho z plováků hloubce 75 m
13	1.2	Test vodotěsnosti kabelové průchodky	Nepatrné vlasečnicové průsaky
14	1.2	Test řízení motorů, ovladatelnosti	Chyba v buzení motorů
15		Test nasávacího odběrového zařízení	Zařízení fungovalo dobře, je nutné si dávat pozor na nasávání písku, poměrně rychle se zanáší filtr
16		Test zařízení na odběr vzorků vody	Potřeba dát pozor na manipulaci se vzorky po vytažení z vody
17	1.2	Test řízení motorů, řízení světél vlastní konstrukce	Úspěšný
18	1.2	Test nasávacího odběrového zařízení	Úspěšný, lépe vyřešit postup vyndávání z vody(voda má tendenci vypláchnou všechny vzorky pryč)
19	1.2	Test řízení světél vlastní konstrukce v rámci nočního ponoru	Úspěšný

Celkem bylo spolu s vývojem nové průchodky a testy na Slapské přehradě provedeno více jak 30 ponorů. Do návrhu verze V2 používáme princip funkce odběrových zařízení, světla pro dosvícování expozice v různých částech spektra. Z řídicí elektroniky se osvědčilo řešení rozšiřování schopností řídicího počítače pomocí mikroprocesorů z řady STM32F030.

Na základě zkušeností se ukázalo jako velmi žádoucí (zejména tam kde se vyskytují na soli bohaté aerosoly) aby se ROV dalo zapnout / vypnout bez potřeby otevírat tlakový trup. Možnost nabíjení bez nutnosti cokoli rozdělovat je také velkou výhodou z pohledu užívání na lodi atp..

Při testování došlo k implozi jednoho z plováků vyrobených z PVC. Tuto implozi způsobila chemickou degradace a únava materiálu. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli přestat tento typ plováků používat.

Vývoj nové kabelové průchodky ukázal na rizika spojená s postupným vznikem vlasečnicových průsaků z důvodu možné degradace (např teplem při pájení kabelů) nebo objemové smrštitelností zalévacích hmot pokud (Epoxy, PU) pokud jsou použity ve velkém objemu.

Ethernetový kabel je velmi citlivý na kvalitu provedení kabelové průchodky z důvodu cross talkingu. Zároveň výroba průchodky pro ethernetový kabel je velmi náročná na správný postup zalévání. PVC obal kabelu navíc v slané vodě degraduje a při nevhodném skladování mění svůj tvar čímž dochází ke snížení jeho strukturní pevnosti.

Ponory z mateřského plavidla na volném moři ukázali na potřebu vyřešit stabilizaci plavidla nad místem, kde spustilo ROV aby se nestalo, že vlivem vln a větru bude mateřské plavidlo bude vléct ROV za sebou.. V lokalitách, kde neznáme přesný profil a charakter nebo se kde panuje špatná viditelnost, je velkou výhodou mít na palubě ROV také jednoduchý sonar.

S ohledem na povětrnostní podmínky a roční období (podzim a zima 2023 - 2024) většina dosavadních testů jednotlivých subsystémů a jejich integrace do ROV 2.0 probíhala na suchu - v naší vývojové dílně.

Terénní testování kompletního ROV 2.0 řízeného optickým kabelem plánujeme na květen/červen s ohledem na blížící se maturitní zkoušku.

Kapitola 5 – Shrnutí projektu a závěr

5.1 – Shrnutí průběhu a výsledků

I přes velkou náročnost projektu se nám daří vývoj moderních robotických ponorek posouvat úspěšně kupředu. Od léta 2023 jsme vyvinuly koncepčně zcela novou verzi ROV s řadou unikátních řešení a vlastností. Za zmínku stojí zejména následující vlastnosti :

- Nízký hydrodynamický odpor
- Možnost přidělovat externí rozšiřující moduly v závislosti na povaze mise
- Dlouhá výdrž na jedno nabití
- Nízká hmotnost a kompaktní rozměry
- Možnost stereo obrazu / multispektrálního obrazu
- Hloubka ponoru 300 m

Tab. 16: Porovnání ROV V1.2 a V2.0

subsystémy	Parametry ROV V1.2	Parametry ROV V2.0
Plováky	Tvrdá pěna (PUR) ošetřená laminací	Tvrdá pěna (PUR) ošetřená laminací / Kompozitní materiál z dutých skleněných kuliček a pryskyřice
Rám	PVC trubky	Hliník / PE / 3D tištěné PLA / PETG
Trup	Hliník 6063 nebo 6082, zesílená kabelová průchodka	Hliník 6063
Napájení	LiPo 3S 5 – 10 Ah	LiIon 3S 2*20Ah
Thrustery	6x Verze B1	6 x Verze B2
Kamery	RPi HQ CAM, IMX 462	Pri CAM V3, IMX 307
Světla	LED 12V	LED 12V - regulovatelné
Komunikace	Ethernetový kabel TCP/IPv4	optický kabel TCP/IPv4
Řídící jednotka	Raspberry PI 4B	Raspberry PI 4B
délka kabelu	80 m	řádově nižší stovky metrů (není problém prodloužit)
rozměry[V:Š:D]	600 x 600 x 800	200 x 500 x 500
hmotnost	15 Kg	10 kg
rychlost	3 uzly	4 uzly
výdrž	0,5 – 1 h v závislosti na použitých bateriích a využívání motorů	1 – 5 h v závislosti na využívání motorů
max hloubka	75 m	300 m

V rámci pokračujícího vývoje plánujeme v průběhu dubna a května 2024 uskutečnit několik dalších testovacích ponorů v lomech a pískovnách v okolí Pardubic a na Slapské přehradě..

Do konce léta roku 2024 plánujeme otestovat ROV2.0 v rámci expedice za U206 a v druhé polovině roku též při mapování biodiversity vybraných lokalit v Jaderském případně i Rudém moři.

Pro ponory do větších hloubek plánujeme pro verzi ROV 2.1 vyvinout nový tlakový trup o větší délce a menším průměru.

Náš další postup můžete sledovat na webových stránkách projektu:

<https://technecium.org/projekty/rov-knowtilus/>

Projekt nám vedle uspokojení ze zajímavé tvůrčí práce, ukazuje nové možnosti profesního uplatnění, učí nás novým způsobům řešení problémů, obohacuje nás o praktické zkušenosti s experimentálním vývojem a dává nám příležitost potkávat nové a inspirující lidi z jiných 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/>

Rovmaker.org (2.2.2024) *dostupné z:* <https://rovmaker.org/product/m16-cable-penetrator/>
<https://rovmaker.org/product/lumen-subsea-light-for-rov-auv/>

www.arrow.com (15.9.2023) *dostupné z:* <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/nvidia-jetson-nano-vs-raspberry-pi-3-a-plus-and-b-plus>

jackson.engr.tamu.edu (12.10.2023)
dostupné z <https://jackson.engr.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/229/2023/03/Roarks-formulas-for-stress-and-strain.pdf>

wartsila.com (20.3.2024) *dostupné z:*
<https://www.wartsila.com/images/default-source/products/gears-propulsors/thrusters/underwater-mountable-thrusters/underwater-mountable-thrustere9b2e14a7f0f601bb10cff00002d2314.png>

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

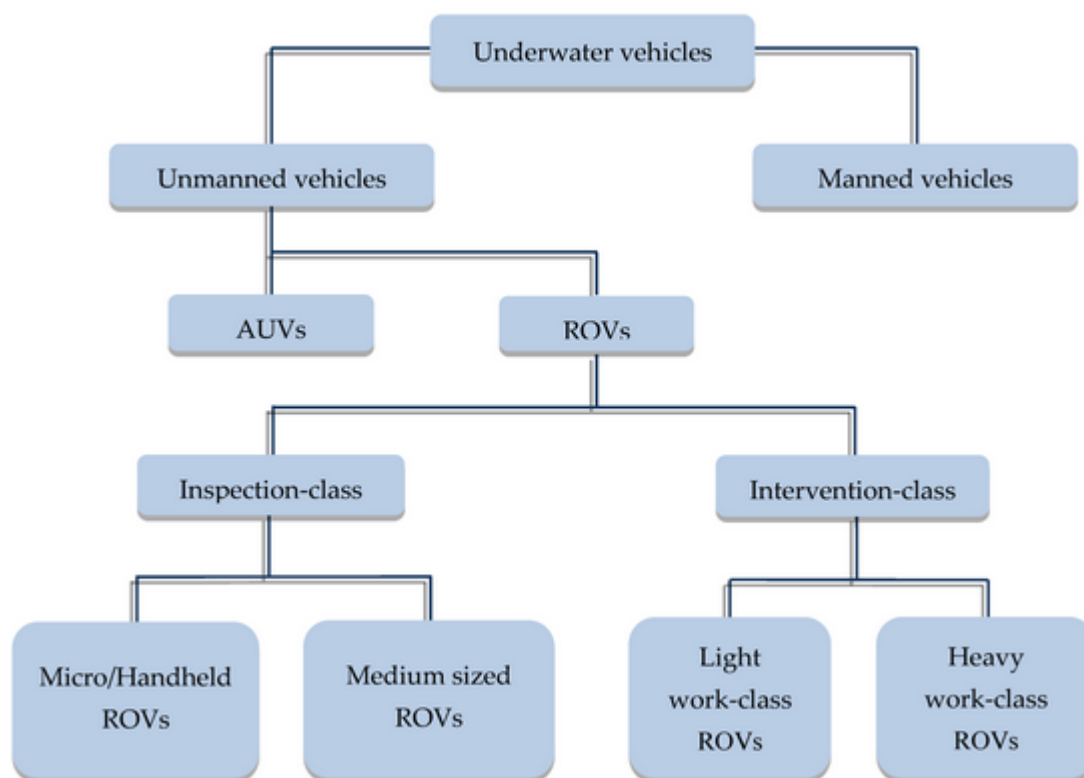
Příloha 1 Stručný úvod do problematiky ROV

V druhé polovině 20. století byla technologie ROV široce rozvíjena zejména v rámci vojenského výzkumu a průmyslu 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.

Odvětví	Nejčastější ROV
Energetika – větrné elektrárny, těžba ropy a plyn, vodní elektrárny	Celkové vzhledové inspekce Blízké vzhledové inspekce (podíváme se pozorně na stav podvodní infrastruktury) NDT prohlídky Rozmístění a obnova infrastruktury Řídicí zásahy
II Armáda a bezpečnostní sektor	Záchrana ponorky Improvizované výbušné zařízení přenášené vodou (WIED) Zásah na moře a přílepký Speciální záchranné operace (např. obnova sestřeleného letadla) Inspekce námořního majetku Hydrografie
Oceánografie a vědy o moři	Aplikace akademického výzkumu pro pozorování korálů a mořského života a sběr sedimentů
Vnitrozemská vodní infrastruktura (nádrže, přehrady, a kanály)	Posouzení stavu a monitorování odběru vzorků sedimentu Odstraňování kalů bagrováním Sběr trosek

Záchranný sbor	Forenzní posouzení zotavení utopené oběti Obnova zařízení Vyhledávání a dokumentace ve velkém měřítku
technické potápění a záchrana/vyzvedávání po- topených lodí	Připevnění a uvolnění háčků pro instalaci a obnovu zařízení Stavební a záchranné práce (jako je řezání a sva- řování)
Akvakultura	Monitorování vybavení a infrastruktury Správa a obnova lana Oprava sítě Mort Retrieval Cleaning
Nakládání s jaderným odpadem	Řízení palivové tyče Sběr a odstraňování trosk Obecná vizuální kontrola Řezání a obnova NDT prohlídky
Podvodní výzkum	Obecné vizuální pozo- rování načítání objektů

Vedle klasických ROV, která jsou připojena k uživateli / pilotovi kabelem, sloužícím vedle přenosu dat/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, tzv. AUV). Obě skupiny se proto někdy společně označují jako UUV (Unmanned Underwater Vehicle). Členění UUV ukazuje níže uvedený obrázek.



Obr. 8: 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.

ROV se dělí na intervenční/pracovní ROV využívané zejména v odvětví námořního strojírenství, s drtivou většinou jejich použití v pobřežním ropném a plynárenském průmyslu. Tuto skupinu lze rozdělit na lehké a těžké modely pracovní třídy. V té první 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 také manipulátory umožňující jim vykonávat práce, jako je 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 zajišťují obvykle hydraulicky ovládané 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.

ROV inspekční/observační třídy vč. Mikro ROV

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

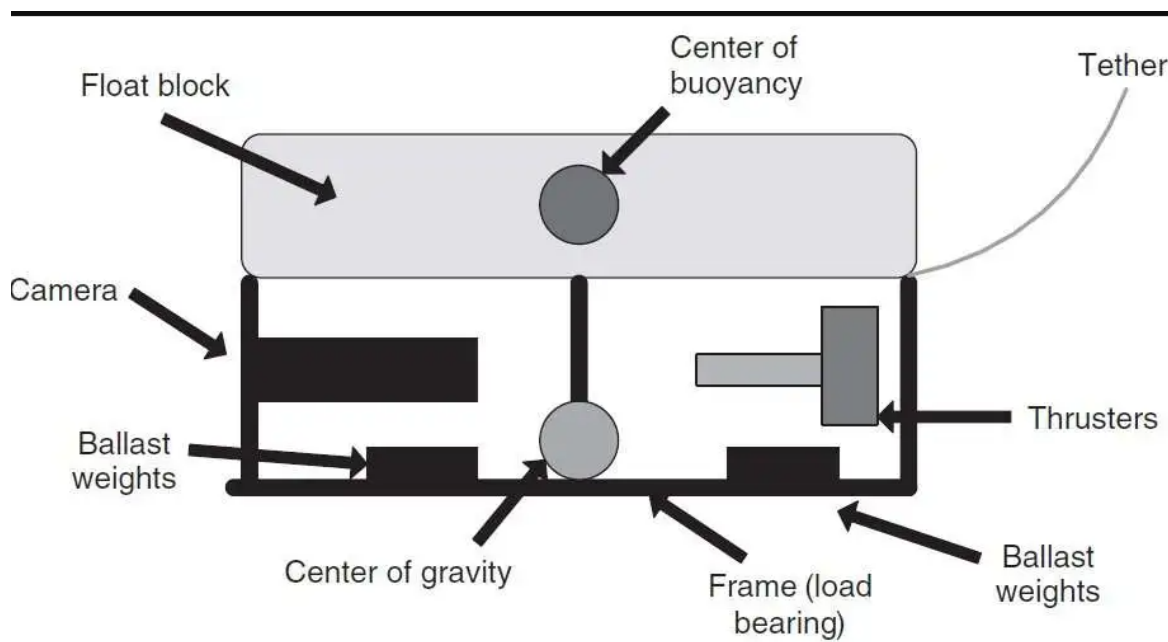
1. **inspekční ROV střední velikosti** (řádově vyšší desítky až stovky kilogramů, pro manipulaci nutný naviják s ramenem)
2. **mikro ROV** (vyšší jednotky až desítky kg)

Středně velké 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, fixaci 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 důležitá pro přesné sonarové průzkumy. Středně velké ROV jsou obvykle napájeny 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.

Design a vlastnosti současných ROV

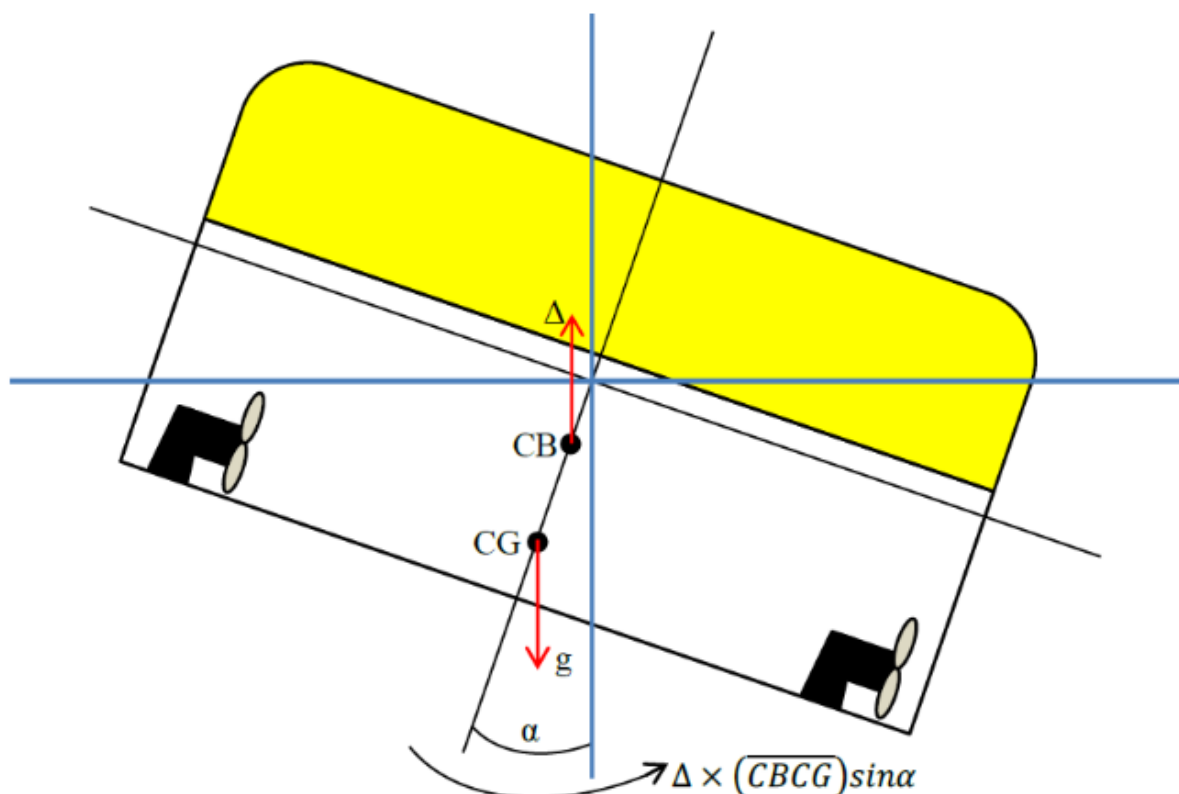
Schéma uspořádání typického observačního / inspekčního ROV



Obr. 9: 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 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. 10: Vliv polohy centra vztlaku a těžiště na stabilitu (zdroj: *Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review*)

Plováky a 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 z 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, které jsou určené 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 však je 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.

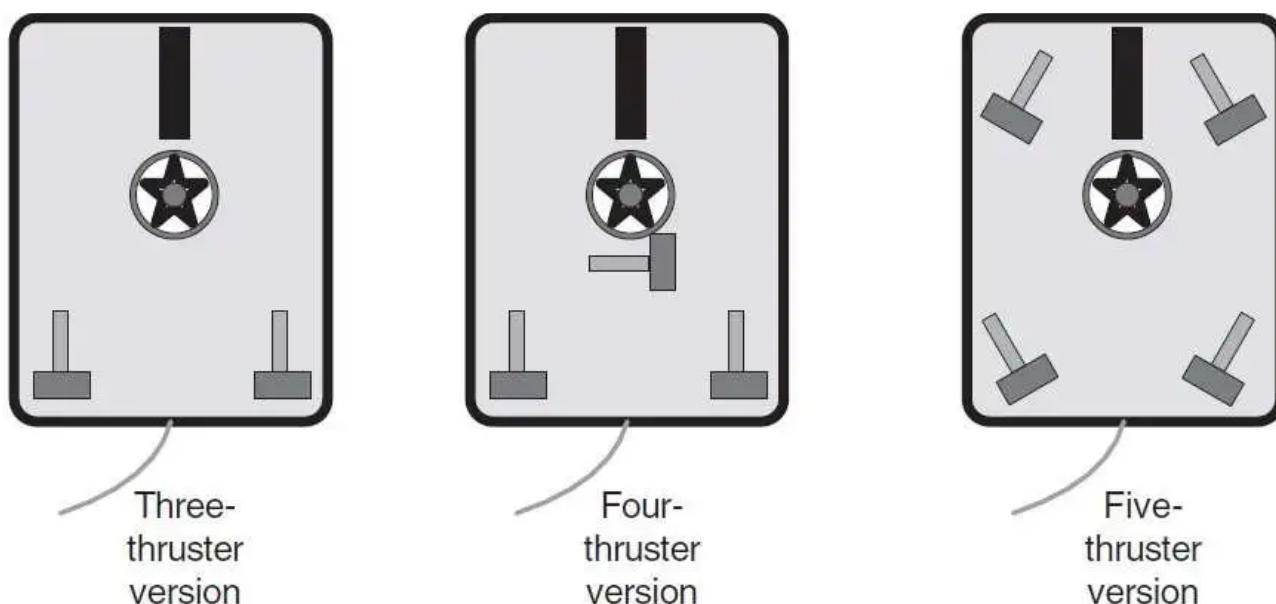
Vysoce obratná (multilaterální) ROV, u nichž se polohy CB a CG de facto překrývají, se nejčastěji vyskytují u Mikro ROV, určených pro hobby nebo observační účely, kde je vysoká obratnost výhodou také z hlediska snímání kamerou. V souvislosti s rozvojem inteligentních asistenčních algoritmů řízení se 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 thrusterů umístěných tak, aby momentové rameno jejich síly vzhledem k CB dávalo ROV, náležitou manévrovatelnost a ovladatelnost ve všech 3 osách.

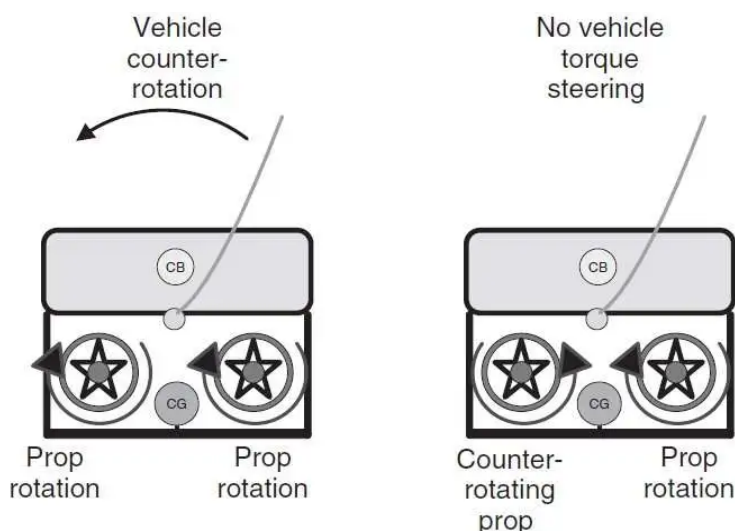
Manévrování ROV probíhá pomocí vektorování tahu pohonných jednotek (trysek). Míra asymetrického tahu závisí na umístění a výkonu pohonné jednotky. Existuje celá řada možností umístění trysek, které umožňují různou míru manévrovatelnosti.

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.

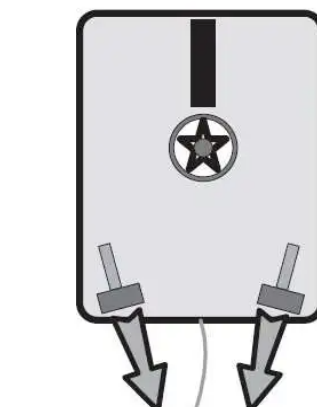


Obr. 11: Možnosti uspořádání thrusterů (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 51)

Další možností je odklonění trysek od podélné osy vozidla (viz obrázek 6), které zlepšuje moment otáčení kolem vertikální osy, a přitom poskytuje ROV stále velmi dobrou podélnou stabilitu.

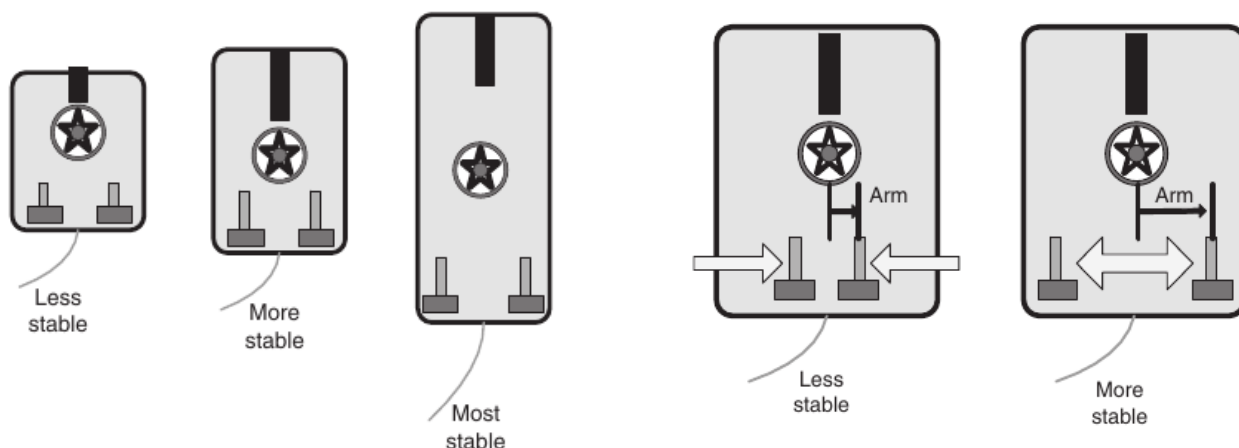


Obr. 12: Vliv směru rotace thrusteru (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 52)



Obr. 13: Způsob, jak umístit thrustery nerovnoběžně s osou (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 51)

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 opačným k smyslu otáčení lodních vrtulí/dmychadel (viz obrázek 5).



Obr. 14: Vliv délky ROV na jeho směrovou stabilitu (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 26)

Obr. 15: Vliv vzdálenosti trysek na stabilitu ROV (Robert D. CHRIST, Robert L. WERNLI SR, 2007 THE ROV MANUAL str. 26)

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

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 zorné pole kamer a pracovní prostor pro manipulátory. Větší množství světél s zároveň vytváří potřebnou redundanci pro případ, že dojde k poškození světél

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 lithiové baterie a také není omezeno životností baterie. Na druhou stranu, horní napájecí zdroje musí mít určitá bezpečnostní opatření na ochranu jakéhokoli blízkého lidského potápěče. Pokud to životnost baterie dovolí, ROV napájené bateriemi mohou být výhodné pro rutinní kontroly díky jejich minimální konstrukční ploše.

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 velíns 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 – „tether“

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

Přídavné vybavení:

Aby bylo možné připojit externí zařízení mají některá ROV konektory poskytující napájení a komunikační sběrnice. Mezi typická zařízení tohoto typu patří:

Sonar

Při operacích za nízké viditelnosti způsobené rozvřenými 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 výpočtu 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).

Drapáky, manipulátory a jiné nářadí

Manipulátory, drapáky a jiné nářadí dovoluje ROV vykonávat další činnosti než pouhé pozorování. Manipulační ramena se mohou pohybovat od malých drapaků 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 umísťování přístrojů a nástrojů do přesných pozic.

Příloha 2 - Přehled stávajících systémů Mikro ROV a jejich vlastností

Tab. 17: 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\$

Příloha3 – obrázky:

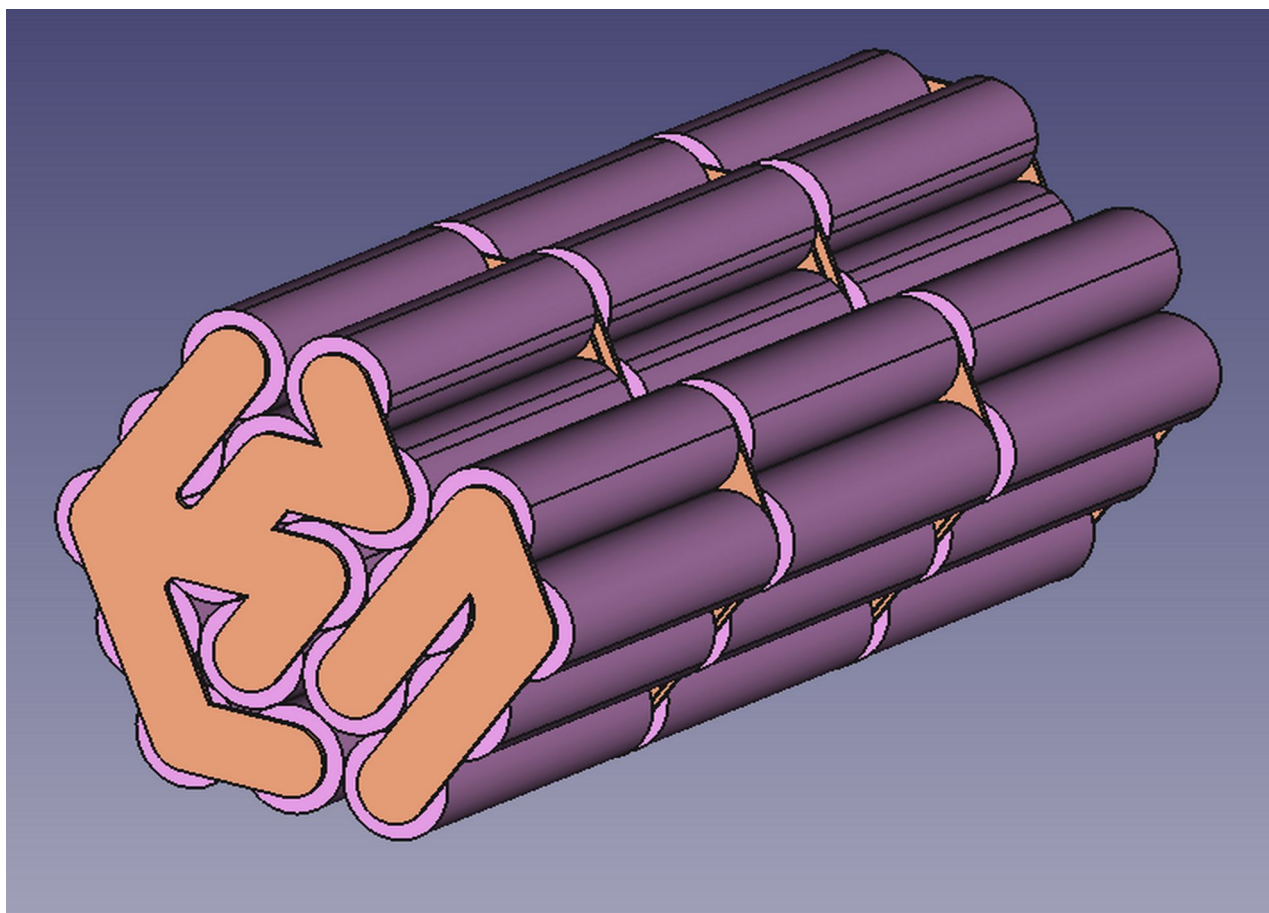
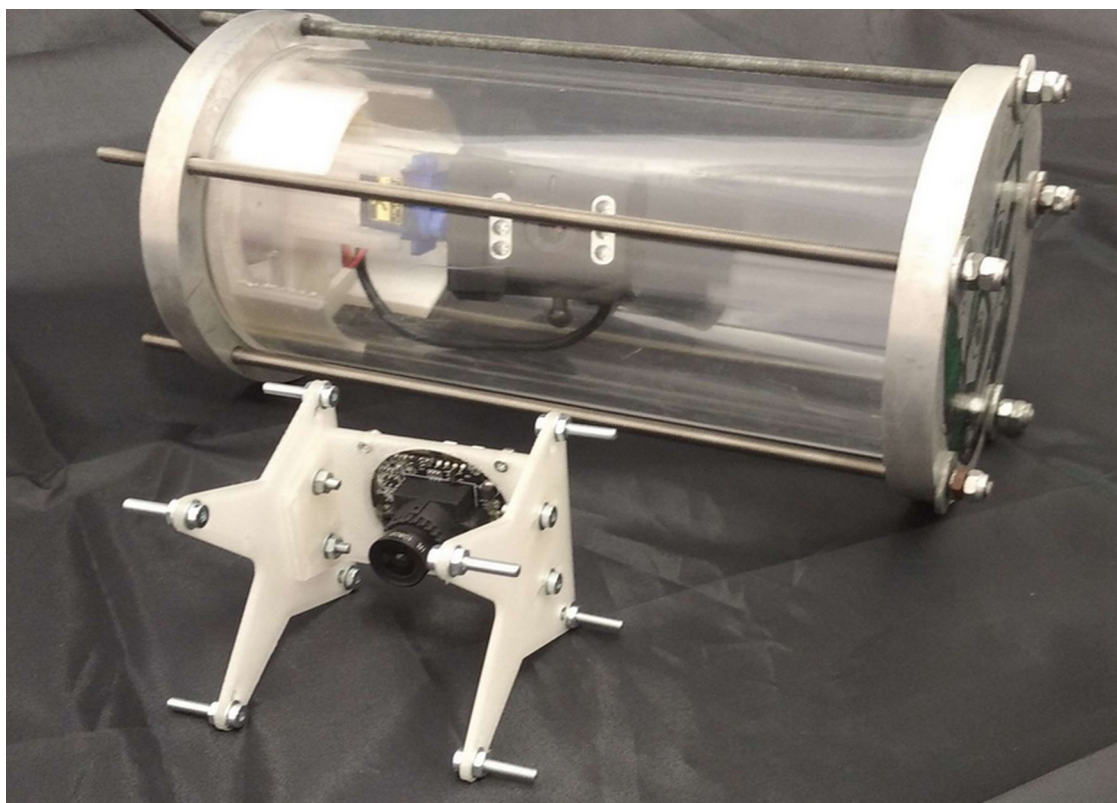


Figure 1: Nový battery pack 3S 60Ah



Figure 2: GUI ovládací obrazovky ROV



Figure

3: Horní gondola z novým modulem s kamerou v předu



Figure 4: Nasávací odběrové zařízení

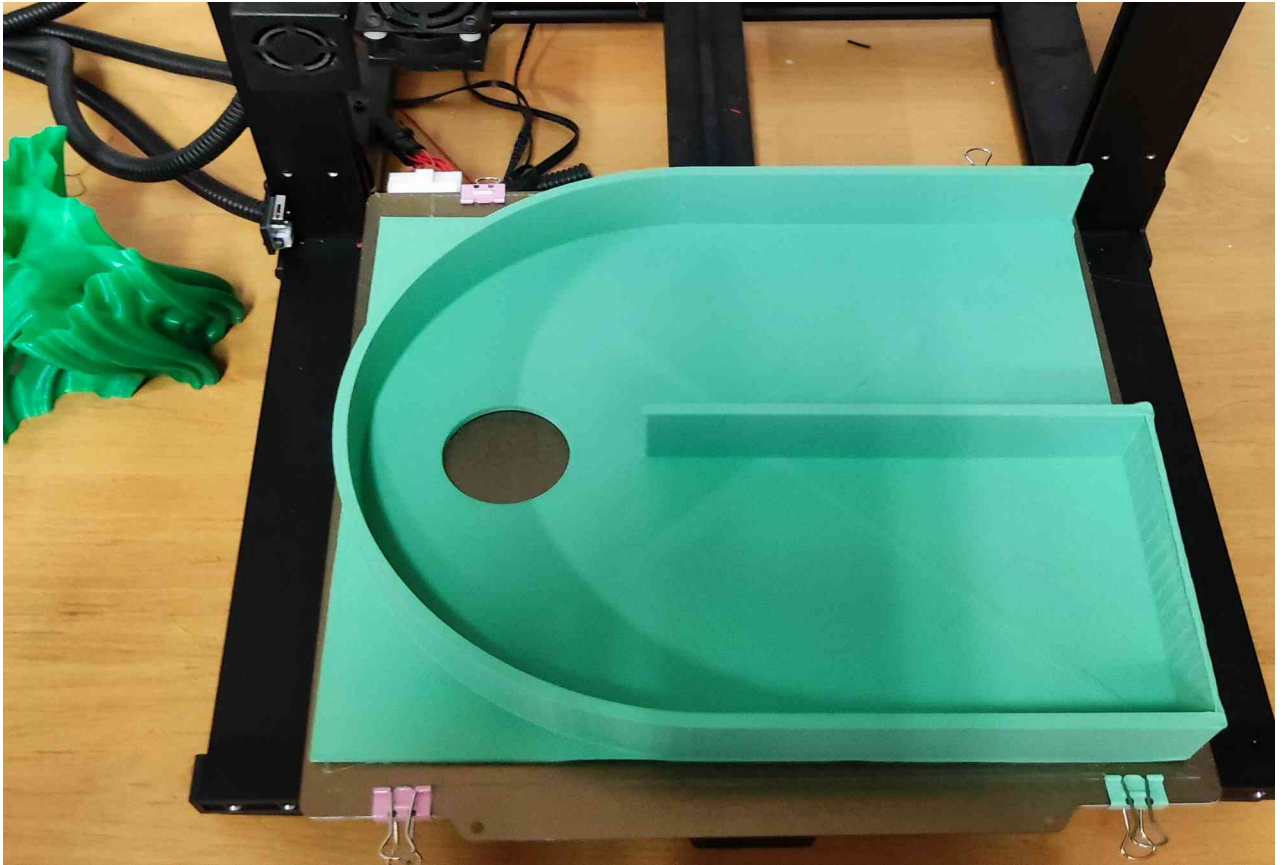




Figure 5: Odběrové zařízení na foltraci planktonu

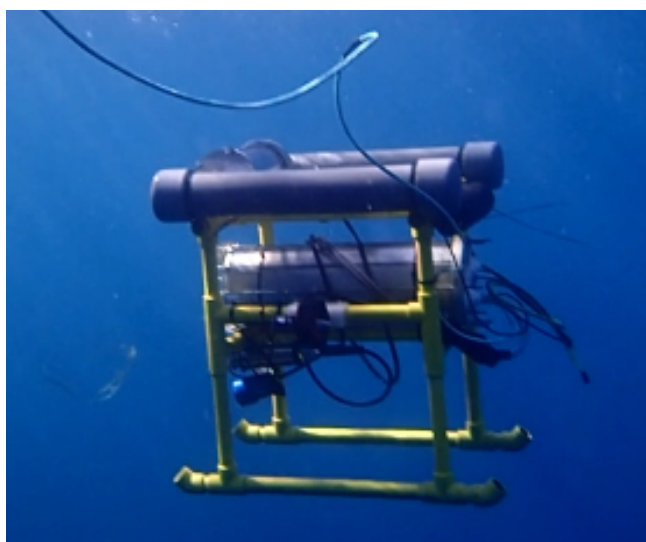


Figure 6: ROV V1.0 při testování

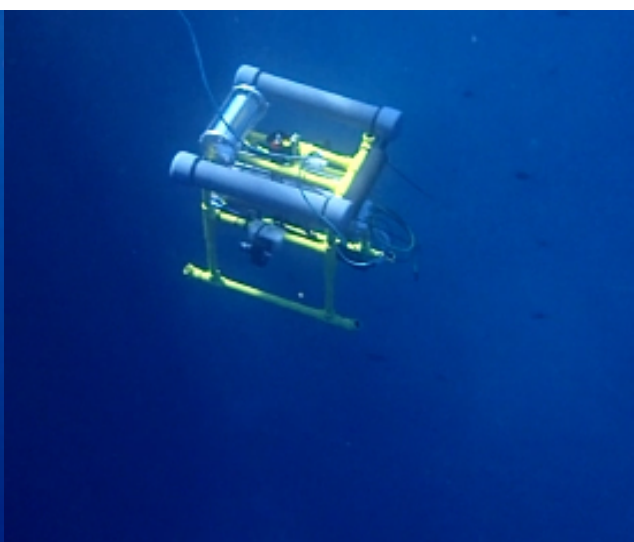


Figure 7: ROV V1.0 při testování

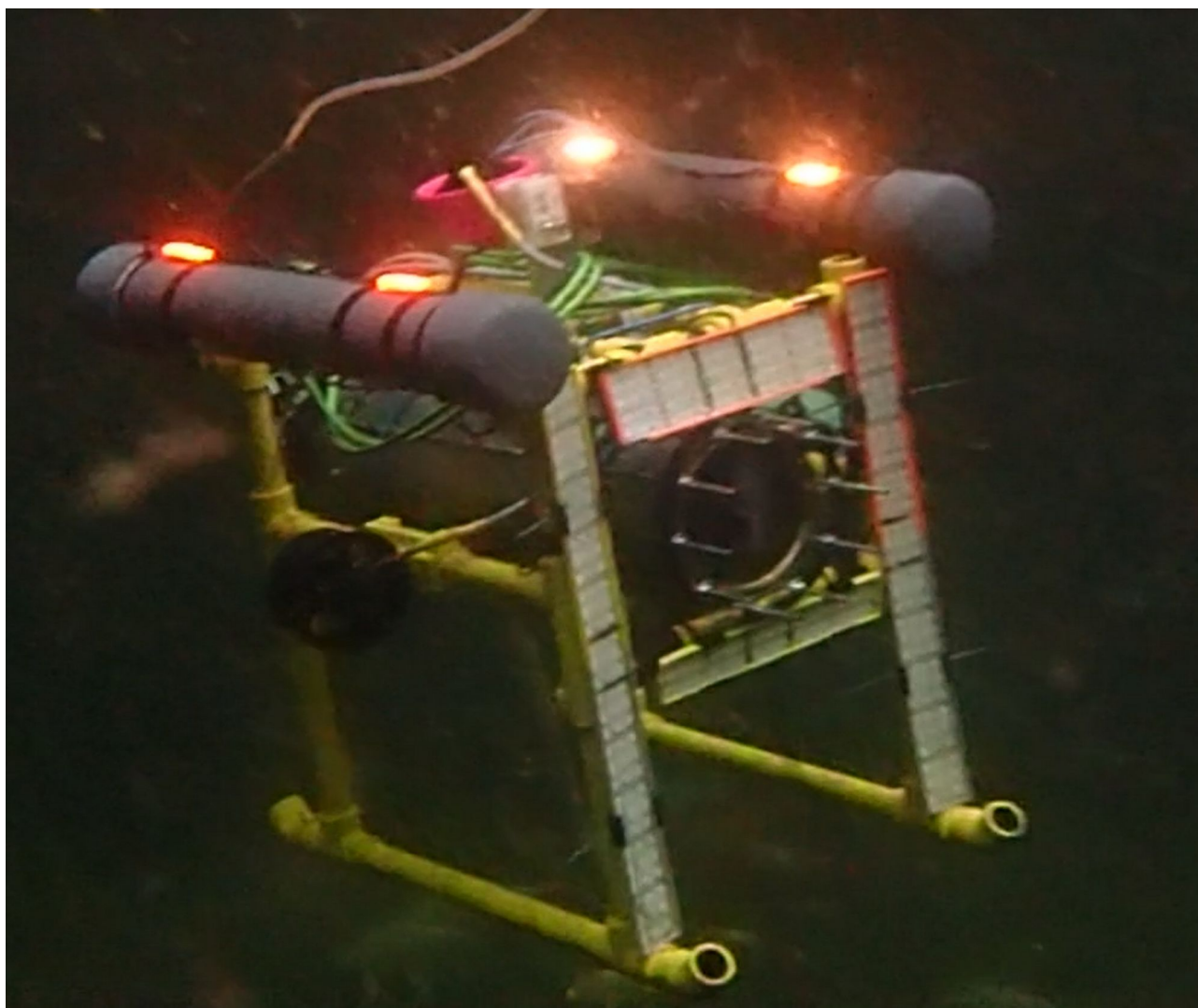


Figure 8: Testovací ponor ROV V1.1