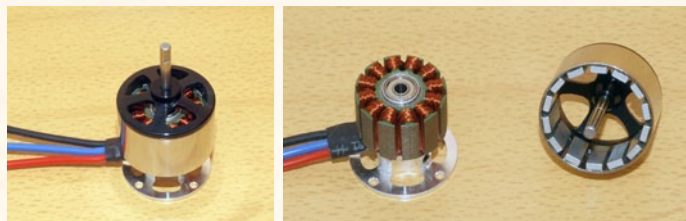


POSTAVTE SI ROBOTICKÚ PONORKU III. DOKONČENIE A TESTOVANIE PONORKY V OCEÁNE

Vodotesnú kameru s osvetlením postavenú v minulom článku dáme do pohybu motormi s vrtľou. Lacné motory vyrábané pre modelárske helikoptéry (dróny) upravíme tak, aby boli použiteľné pod vodou pri vysokom tlaku. Ovládačom budeme spínať jednotlivé motory a regulovať ich smer a rýchlosť. Ukážeme si jednu praktickú konštrukciu rýchlo postavenú z vodovodných rúr a akrylovej dosky. Ponorku nakoniec vyvážeme tak, aby bola správne orientovaná a zároveň sa vo vode vznášala. Testovanie bude prebiehať najprv vo vani, potom v bazéne a nakoniec v oceáne, čo si budete môcť pozrieť na videu.

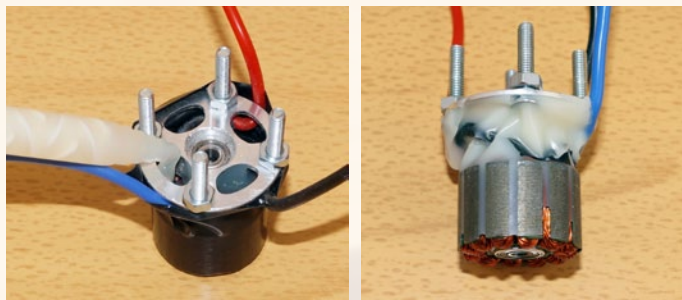
Úprava motorov na použitie pod vodou

Vybrať vhodné motory odolávajúce vode a tlaku je v amatérskych podmienkach najťažšou úlohou. Profesionálne motory sú príliš drahé (ich cena sa pohybuje v stovkách eur za kus), a preto amatérom neostáva nič iné, ako dômyselne upraviť motory, ktoré nie sú primárne určené na styk s vodou, a už vôbec nie na použitie pod vodou. Rôzne možnosti, ako sa to dá urobiť, uvedieme v ďalšom článku. Jednou z overených metód je úprava štandardných motorov pre modelárske helikoptéry. Ide o trojfázové motory, v ktorých rotujú magnety spolu s vonkajším obalom. Vďaka tomu, že motor nemá zberače ani uzavreté vzduchové medzery, rovnako dobre funguje aj pod vodou pri vysokom tlaku, hoci to asi nebolo cieľom výrobcu. Jeho dlhodobú spoľahlivosť však naruší korózia. Vzhľadom na to, že motor je lacný (jeho cena sa pohybuje rádovo okolo 8 €), môže byť snaha upraviť ho do nezničiteľného stavu kontraproduktívna. Pri výbere motora je dôležité všimnúť si jeho výkon a rýchlosť otáčania (počet otáčok za sekundu). Výkonné motory majú vysokú spotrebu, preto hľadáme výkon do 150 W. Rýchlosť otáčania hľadáme čo najmenšiu, pretože motor je určený na vzlietnutie helikoptéry, kým voda kladie vrtuli podstatne väčší odpor ako vzduch. Použijeme tri motory 2213N s výkonom 100 W a rýchlosťou otáčania 800 KV (jednotka KV znamená počet otáčok za minútu pri napätí jeden volt). Tento motor vieme aj ľahko rozobrať na dve časti – rotor a stator.



Aby sme zabránili elektrolytickej korózii, zalejeme epoxidom miesto, kde sú vodiče prispájkované k cievke. Najprv odstránime jednu spoločnú sťahovaciu bužírku a stator oblepíme lepiacou páskou, aby sa epoxid neroztekal. Musíme myslieť na to, že motor raz budeme chcieť pripievať ku konštrukcii, preto naň už teraz navlečieme skrutky.

Epoxidom môžeme opatrne zaliať aj druhú stranu statora, čím bude celá cievka statora chránená. Pre dobrú izoláciu však stačí stator natrieť lodným lakom (nenatrite však guľôč-



kové ložiská). Náš motor má dve ocelové ložiská s rozmermi 3 mm x 7 mm x 3 mm a 3 mm x 8 mm x 4 mm. Prvá vec, ktorá sa na našom motore pravdepodobne pokazí, bude práve jedno z týchto ložísk. Hoci sú vyrobené z nerezovej ocele, po niekoľkých ponoroch v slanej vode sa budú jemne zadržávať. V sladkej vode sa dajú použiť mnohonásobne. Ponúkajú sa nám tieto možné riešenia:

- Pred každým ponorom dôkladne nastriekame celý motor hydrofóbnym silikónovým sprejom, ktorý výborne chráni pred koróziou.
- Vymeníme ocelové ložiská za keramické alebo za plastové priechodky.
- Raz za čas vymeníme ocelové ložiská za nové.

Najjednoduchšie je skombinovať prvý a tretí bod. Náhradné ocelové ložiská sa dajú na internete ľahko zohnať a stoja niekoľko centov za kus, keď sa kúpia vo väčších množstvách (zvyčajne už od desiatich kusov). Cena keramických ložísk niekoľkonásobne prevyšuje cenu motora, a teda ich používanie nie je pre nás výhodné.



Výberanie jedného ložiska a náhradné ocelové ložiská

Niektorí konštruktéri zašli ďalej. Cievku statora kompletne pokryli teplovodivým epoxidom a vložili ju do vákuovej komory, vďaka čomu unikli vzduchové bublinky a epoxid prenikol hlboko do cievky. Potom celý povrch statora nastriekali autolakom proti korózii. Ocelové ložiská vymenili za špeciálne plastové priechodky s nízkym trením. Medzery medzi magnetmi vyplnili epoxidom kvôli turbulencii. Výsledný supermotor sa dokáže bez prestávky točiť na plný výkon celé mesiace v slanej vode. To môže byť priveľa práce za málo muziky a má to význam hlavne vtedy, ak ste na lodi uprostred oceánu, kde každá oprava ponorky, ako je napríklad výmena motorov, stojí čas neporovnateľne drahší, ako je ich cena.

Teraz zvolíme vrtuľu, ktorá zaručí najlepší ťah pri danej spotrebe. Podľa rôznych testov je najlepšia trojlopatková vrtuľa pre modelárske lode. Ešte lepší ťah má dvojlopatková vrtuľa pre rýchle pretekárske lode, lenže tá má výrazne slabší ťah v opačnom smere. Keďže pri navigácii ponorky budeme často využívať oba smery, nie je pre našu ponorku vhodná. Najdená trojlopatková vrtuľa nemusí vždy pasovať na os

nášho motora. Vtedy môžeme os motora rozšíriť lepiacou páskou a vrtuľu prilepiť epoxidom. To je dôsledok toho, že kombinujeme motor pre helikoptéry s lodnou vrtuľou.



Riadenie motorov

Riadenie trojfázových motorov nie je také jednoduché ako riadenie známejších motorov s dvoma vstupmi. Každý motor musíme pripojiť na špeciálny ovládač ESC (*Electronic Speed Controller*). Pri výbere ESC nás zaujíma možnosť napájať napätím 11,1 V, čiže batériu LiPo 3S, schopnosť poskytovať motoru prúd niekde medzi 10 a 25 A a to najdôležitejšie – ESC musí byť určené pre modelárske autá a nie lietadlá ani helikoptéry (keďže lietadlá nevidíme cúvať a helikoptéry nepotrebujú urýchľovať pád, väčšina týchto ESC vie ovládať rýchlosť motora len jedným smerom). ESC potrebuje vstupný signál, ktorý povie, ktorým smerom a ako rýchlo sa má motor točiť. Tento vstup poskytne servotester.

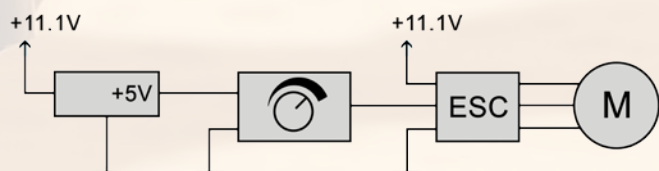
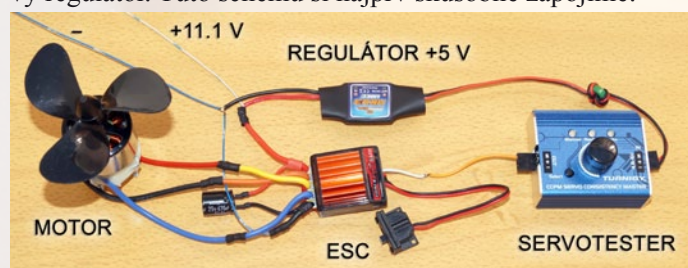


Schéma zapojenia napätového regulátora, servotestera, ESC a motora

Servotester sa štandardne používa na riadenie pozície servomotora, teda odskúšanie, či servomotor funguje správne. My ho však pripojíme na ESC, ktoré sa pripája rovnako, akoby to bol servomotor. Kým servomotor by interpretoval vstupný signál ako presnú pozíciu vpravo alebo vľavo, trojfázový motor pripojený na ESC mení smer a rýchlosť. Servotester potrebuje vstupné napätie 5 V, preto použijeme napätový regulátor. Túto schému si najprv skúšobne zapojíme:

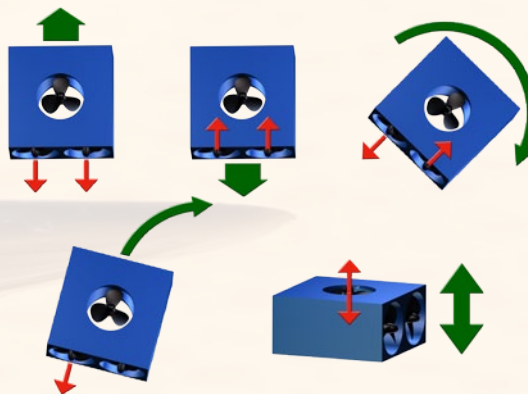


Skúšobné zapojenie vyššie uvedenej schémy

Pozor na prsty, vrtuľa má pri plnom výkone dosť sily na to, aby sa do nich zarezala. Je pravdepodobné, že motor nebude hneď fungovať, ako má, napríklad v opačnom smere sa bude točiť len s polovičnou rýchlosťou alebo vôbec. ESC treba kalibrovat' a preprogramovať podľa manuálu priloženého výrobcou. Počas programovania motor vydáva pípavý zvuk a podľa počtu pípnutí nastavujete rôzne parametre pomocou servotestera. Pre nás podstatné nastavenia sú: 100 % výkon v opačnom smere, typ batérie LiPo 3S (alebo automatická detekcia napätia) a žiadne brzdenie v neutrálnom stave. ESC

môže mať množstvo iných nastavení a môžete s nimi experimentovať, aby bol chod motora plynulý.

Naša ponorka bude mať tri motory a ich riadením ju dokážeme navigovať dopredu, dozadu, hore, dole, otáčať ju na mieste či robiť oblúky. Priestorové umiestnenie motorov a všetky užitočné pohyby znázorňuje nasledujúci obrázok. Červené šípky ukazujú smer poháňanej vody vrtuľou a zelená šípka ukazuje výsledný pohyb.



Dve zadné vrtule je ideálne zvoliť pravotočivú a ľavotočivú. Pri pohybe vpred sa tak točia opačne – symetricky – a eliminuje sa efekt ťahania do strany.

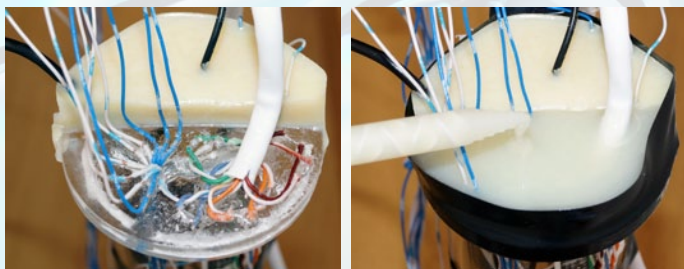
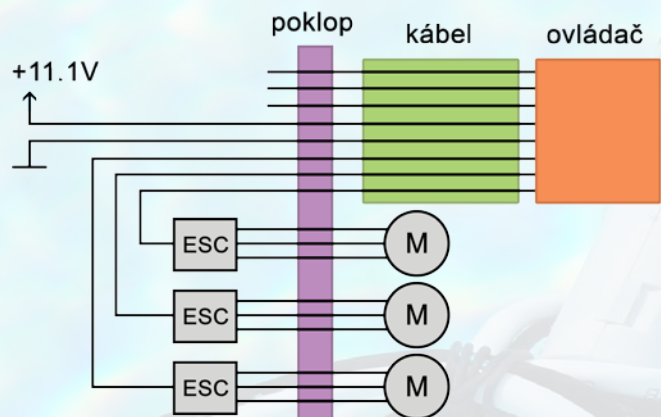
Prenos napätia a signálu káblom

Podme spočítať, koľko vodičov kábla budeme potrebovať na ovládanie ponorky s tromi motormi. Ako vidno zo schémy, každé ESC potrebuje jeden vstupný signál, teda spolu máme tri signály. Ovládač bude napájaný batériou v ponorke, kvôli čomu prenosieme cez kábel kladný a záporný pól batérie. Spolu tak potrebujeme 5 vodičov. Môžeme použiť štandardný internetový kábel, v ktorom je až osem vodičov. Tri nevyužitú vodiče máme k dispozícii na rozširovanie funkcií ponorky. Internetový kábel môžeme prilepiť lepiacou páskou ku koaxiálnemu káblu a máme hotový kábel na ovládanie ponorky aj prenos obrazu.

Samozrejme, môžeme použiť samostatný zdroj v ovládači, a tým pádom by sme nemuseli preniesť káblom kladný pól batérie v ponorke. To by bolo za istých okolností dokonca nutné. Či môžeme použiť jediný zdroj umiestnený v ponorke, nie je samozrejme a musíme to overiť výpočtom. Problémom môže byť úbytok napätia cez dlhý kábel. Typický internetový kábel má odpor 8,4 Ω na 100 metrov. Jeden servotester má odber približne 20 mA. Ten sa dá prípadne znížiť odstránením kontrolných LED diód. Tri servotestery majú spolu odber 60 mA. Ak použijeme najviac 100-metrový kábel, čo vytvára 200 metrov dlhý obvod (prúd tečie z ponorky do ovládača a späť), dostaneme úbytok napätia podľa Ohmovho zákona $U = I \cdot R = 60 \text{ mA} \cdot 2 \cdot 8,4 \Omega = 1,008 \text{ V}$. Zdroj v ponorke má napätie 11,1 V, takže pri prenose cez kábel poklesne na 10,092 V. To je dosť na to, aby sme ho napätovým regulátorom prekonvertovali na 5 V. Môžete si spočítať, či by sme naopak mohli ponorku napájať cez zdroj v ovládači. Motory potrebujú prúd aspoň 5 A, čo by viedlo k úbytku napätia cez kábel až 84 voltov! Minimálne toľko by musel mať zdroj napätia. Nemohli by sme teda použiť štandardnú batériu a také napätie už ani nie je bezpečné vo vlhkých podmienkach. To je dôvod, prečo komerčné hlbokomorské roboty

majú na lodi generátor vyrábajúci stovky až tisíce voltov a prísne bezpečnostné opatrenia.

Cez poklop vodotesného obalu potrebujeme prevŕtať osem nových vodičov z internetového kábla plus deväť vodičov pre motory. Potom opäť zalejeme epoxidom druhú polovicu akrylového disku.

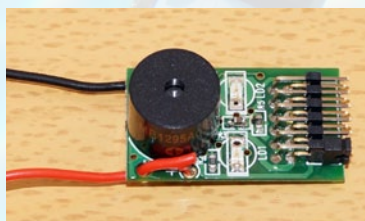


Úmyselne sme urobili až dve diery – jednu pre internetový kábel a druhú pre vodiče vedúce do motorov. Dôvod je ten, že motory majú veľký prúdový odber a navyše prudko kolísavý, čo môže rušiť citlivý signál prechádzajúci cez vodiče v internetovom kábli. Preto sa tieto dva zväzky vodičov navzájom nemajú radi a musia byť ďaleko od seba. Opäť každý z vodičov trochu odizolujeme, aby sme zabránili „pretunelovaniu“ vody cez izoláciu.

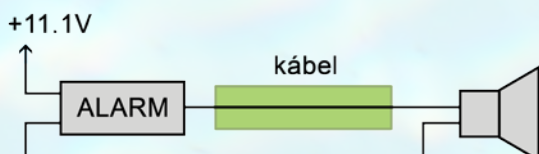
Alarm vybitia batérie

Jednou z nie nutných, ale užitočných súčastí ponorky môže byť alarm, ktorý nás bude včas varovať pred vybitím batérie.

Štandardný alarm na fotografii sa vyrába pre modelárov napríklad do lietadla, aby boli varovaní zvukovou a svetelnou signalizáciou predtým, ako sa vybije batéria a lietadlo havaruje.



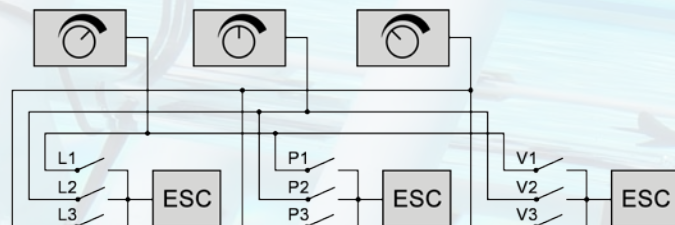
V našom prípade havária nehrozí, avšak odporúča sa, aby napätie LiPo batérie nikdy nekleslo pod 80 % nominálnej hodnoty, ináč sa môže trvale poškodiť. Plošný spoj alarmu bude pripojený na batériu v ponorke. Sirény vyberieme z plošného spoja spájkovačkou, pretože pod vodou by nám nebola nič platná a bude umiestnená v ovládači. Multimetrom zistíme, že jeden vstup sirény je spojený so zemou, takže na



prenos signálu z ponorky do sirény stačí jeden nevyužitý vodič kábla (jeden vodič kábla už je spojený so zemou). Hlasiťosť sa kvôli odporu kábla samozrejme zníži, ale zvuk bude stále dobre počuteľný.

Ovládač

V ruke budeme držať ovládač so servotermi a spínacími tlačidlami. V princípe stačia len servotesty, pretože nimi dokážeme ľubovoľný motor zapnúť, vypnúť, meniť jeho smer a rýchlosť, tlačidlá však zjednodušia ovládanie.



Namiesto toho, aby sme každý motor ovládali zvláštnym servotesterom, zapojili sme to inak pre lepšie ovládanie. Servotesty budú nastavené na danú rýchlosť a tlačidlami budeme meniť smer otáčania motorov. Je to pohodlnejšie a umožňuje rýchlejšiu navigáciu. Na jednom servotestere sme nastavili smer dopredu, na druhom neutrálny smer a na treťom smer dozadu. Tlačidlá L1 – L3 ovládajú ľavý motor, tlačidlá P1 – P3 pravý motor a V1 – V3 vertikálny motor. Ak napríklad stlačíme tlačidlá L1 a P1, ľavý a pravý motor dostanú signál „dopredu“ od toho istého servotestera, takže ponorka pôjde dopredu. Podobne, ak stlačíme naraz L3 a P3, ponorka pôjde dozadu. Na otáčanie na mieste stlačíme naraz L1 a P3 alebo L3 a P1. Väčšina ESC funguje tak, že tlačidlo stačí raz stlačiť a pustiť a motor pokračuje daným smerom a rýchlosťou. Keď sa blížite k objektu, ktorý chcete preskúmať, môžete znížiť rýchlosť pre presnejšiu navigáciu.

Po zapnutí ponorky treba na pár sekúnd držať stlačené každé neutrálne tlačidlo, až kým príslušné ESC nezahrá úvodný tón. Naopak, začatie tlačidlom „dopredu“ zvyčajne prepne ESC do programovacieho režimu alebo kalibrácie.

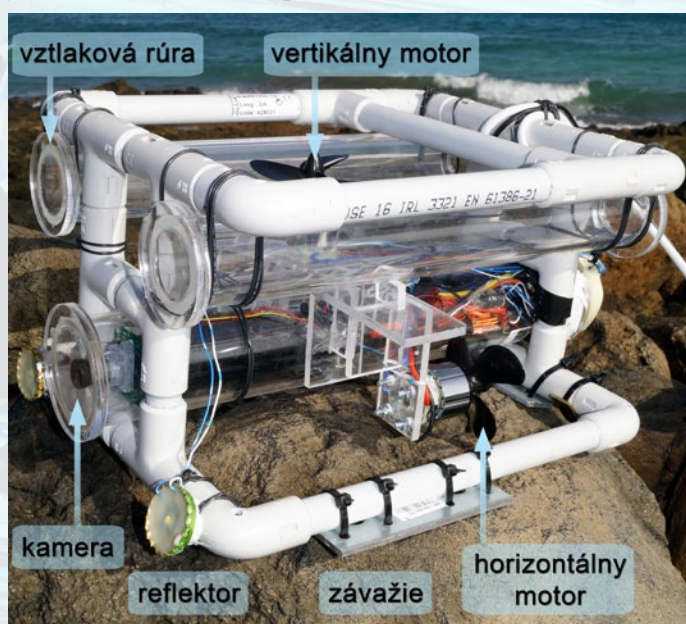
Ovládanie môžete ešte viac zjednodušiť pridaním viacpólových tlačidiel, ktoré vedia naraz zopnúť dva nezávislé obvody. Takže namiesto kombinovania dvoch tlačidiel by stačilo jedno pre každý možný pohyb ponorky. Taktiež vhodnejšie by bolo tri tlačidlá pre daný motor nahradiť jedným páčkovým prepínačom.

Konstruktúciu ovládača môžete vymyslieť veľa spôsobmi. Na fotografii je použitý univerzálny plošný spoj. Ovládač nemusí mať vodotesný obal, ale treba myslieť na to, že ho budeme pravdepodobne chytať mokrými rukami.



Finálna konštrukcia ponorky

Ak riadenie motorov funguje tak, ako má, môžeme dať všetky časti dokopy. Tri ESC aj alarm vložíme do akrylovej rúry, v ktorej je kamera so zdrojom, a napojíme na existujúci obvod. Hlavný spínač ponorky odpája kladný pól batérie, takže naraz spína všetky pridané elektrické komponenty. Vstupy motorov spojíme s vodičmi vychádzajúcimi z vonkajšej strany disku a vodotesne zaizolujeme, ako sme sa naučili v minulom článku. Ak sa niektorý z motorov netočí požadovaným smerom, vymeníme ľubovoľné dva z troch vstupov motora. Finálna konštrukcia je výzvou vašej fantázie a môže byť praktická a účelová, alebo aj dizajnovým skvostom. Dôležité je, aby umožnila dobre pripevniť motory. Najobľúbenejším stavebným prvkom sú plastové vodovodné rúry, pretože sa ľahko krájajú, spájajú tvarmi „T“ a „L“ a lepia lepidlom na PVC. Na nasledujúcej fotografii je konštrukcia zameraná na jednoduchosť a zároveň pevnosť.



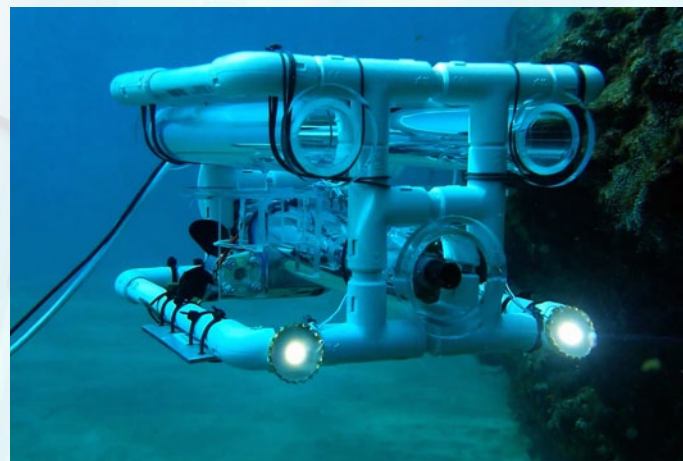
Motory sme priskrutkovali o 4 mm hrubú akrylovú dosku narezanú ručnou pílkou. Kúsky akrylovej dosky sme navzájom pozliepali tak, aby vytvárali pevný spoj. Pri návrhu konštrukcie musíme sledovať niekoľko cieľov: Voda poháňaná vrtuľou musí dobre prúdiť jedným aj druhým smerom. To sa samozrejme nedá dokonale navrhnuť, pretože motor musí byť nejakým spôsobom upevnený, a tak časť konštrukcie určite bude prekážať prúdu vody. Namiesto vodovodných rúr sme použili elektroinštalačné rúry z dôvodu dostupnosti menšieho priemeru. Zmyslom týchto rúr je vytvoriť ochranný obal okolo vrtúľ, aby sa nezničili pri náraze ponorky. Ďalším ich účelom je upevnenie svetiel, vztlakových rúr a závaží. Každý z ôsmich rohov konštrukcie sme zvislo prevítali, aby pod vodou rýchlo unikol všetok vzduch z rúr. Svetlá sme jednoducho prilepili silikónom a jemne ich natočili ku kamere. Na nadľahčenie ponorky sme použili akrylové rúry pevne uzavreté z oboch strán akrylovými diskami tak, ako sme vyrobili vodotesný obal. Aj pre tieto rúry treba výpočtom overiť, či vydržia v požadovanej hĺbke. Keďže ponorka vďaka nim vyplávala na hladinu, napokon sme ju zaťažili kovovými súčiastkami. Ako najvhodnejšie sa ukázali kovové kvádre s dierkami, pretože ich možno pripevniť na konštrukciu sťa-

hovacou páskou. Zaťaženie môžeme postupne doladiť pridaním menších kovových súčiastok. Ako závažia môžeme použiť aj skrutky, rybárske olovká či kamienky, musíme si však premyslieť, ako ich upevníme, aby sa nepohybovali. Možno sa pýtate, prečo ponorku nadľahčujeme a zároveň zaťažujeme. Po prvé, zaťaženie ponorky sa ľahšie doladí ako nadľahčenie, aby sa ponorka vo vode vznášala. Ponorka vyvážená v sladkej vode bude zle vyvážená po ponorení do slanej vody, v ktorej budeme musieť pridať ďalšie malé závažia. Po druhé, vztlakové rúry umiestnené vysoko a závažia umiestnené nízko udržiavajú stabilitu. Ak ponorku pod vodou otočíme hore nohami, mala by sa sama otočiť do pôvodného stavu.

Testovanie

Testovať ponorku môžeme začať vo vani alebo v bazéne, kde ju čo najpresnejšie vyvážíme. Hlavné závažia posunieme tak, aby nebola naklonená a potom pridáme menšie závažia, aby sa vo vode vznášala. Vznášanie nikdy nebude dokonalé a odporúča sa, aby ponorka radšej pomaličky vyplávala. Ak totiž chcete pozorovať dno zblízka a ponorka klesá ku dnu, musíte ju udržiavať v požadovanej polohe pustenou vrtuľou, ktorá poháňa prúd vody smerom ku dnu a rozvírený piesok zhoršuje viditeľnosť. To je aj dôvod, prečo montujeme vertikálny motor v hornej časti ponorky (ďalej odo dna). Po úspešnom otestovaní v pokojnej a priehľadnej vode môžeme prejsť do reálnejších, drsnejších podmienok. Video fungujúcej ponorky vo vani, v bazéne a v oceáne si môžete pozrieť na videu na našej stránke

www.mladyvedec.sk/ponorka.



Aby zvedavým rybám nehrozilo rybie filé, odporúčame natiahnúť okolo vrtúľ ochrannú sieťku na vonkajšiu konštrukciu.

V nasledujúcom, poslednom článku tohto seriálu si povieť postrehy z testovania a niekoľko tipov, ako môžeme ďalej rozširovať funkcionálnosť ponorky. Tá má napríklad jeden významný nedostatok – pozerá sa vždy pred seba a nemôžeme priamo vidieť dno. Zásadným vylepšením by bola pohyblivá kamera pomocou servomotora. Povieme si o rôznych pokročilejších architektúrach s použitím mikropočítačov, o správnej manipulácii s káblom, o ovládaní ponorky pomocou vysielateľa pre RC modely, o použití viacerých motorov pre lepšiu navigáciu či iných overených spôsoboch, ako vyrobiť vodovzdorný a tlakovzdorný motor. Priblížime si zaujímavé súčasne aj budúce projekty.

Andrej Osuský