

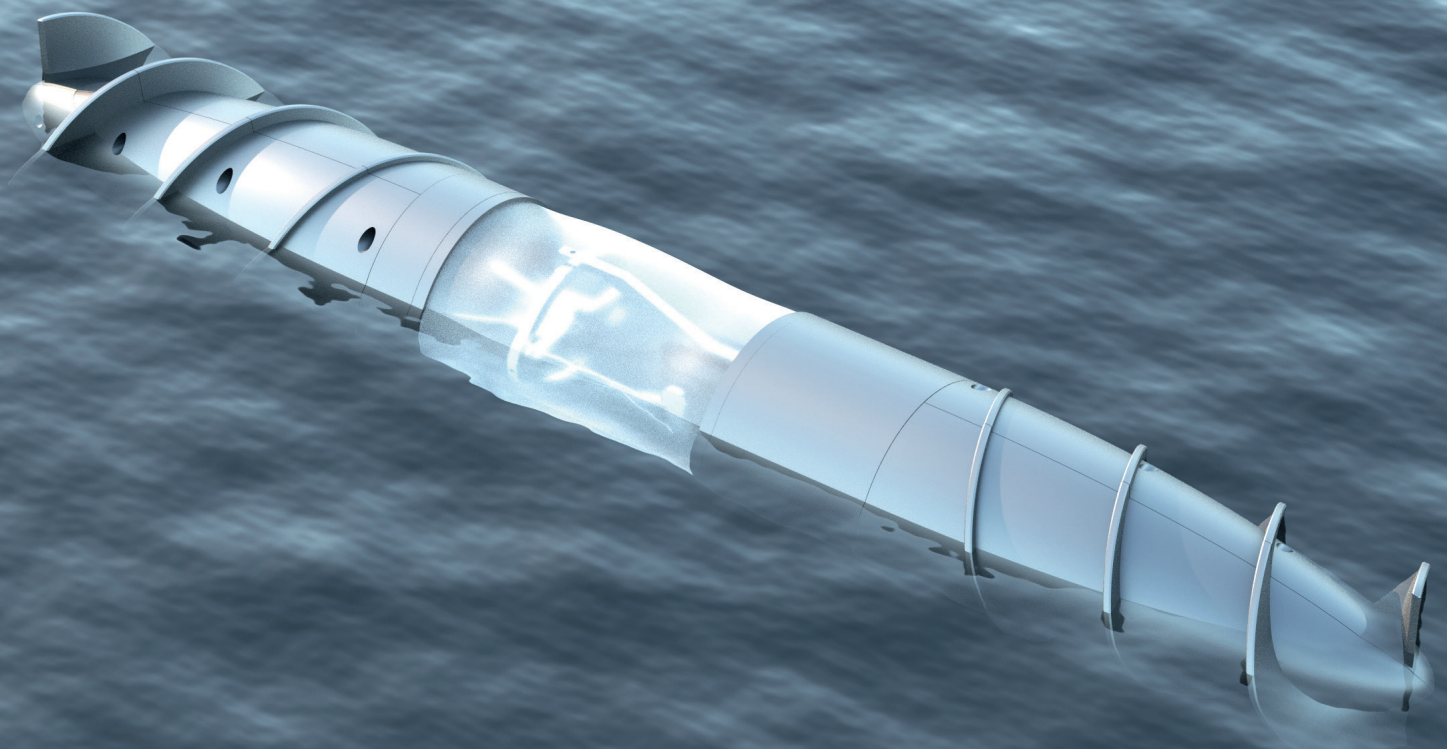


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Mārcis Eimanis

DUBULTHELIKOĪDĀS PIEDZIŅAS PRINCIPA PIELIETOJUMS ZEMŪDENS TRANSPORTLĪDZEKĻOS

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Mārcis Eimanis

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**DUBULTHELIKOĪDĀS PIEDZIŅAS PRINCIPA
PIELIETOJUMS ZEMŪDENS
TRANSPORTLĪDZEKĻOS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
profesors, *Dr. sc. ing.*
JĀNIS AUZIŅŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Eimanis M. Dubulthelikoīdās piedziņas principa pielietojums zemūdens transportlīdzekļos. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-04” 2021. gada 1. decembra lēmumu, protokols Nr. 49.

Vāka attēla autors Mārcis Eimanis

<https://doi.org/10.7250/9789934227387>
ISBN 978-9934-22-738-7

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 10. martā plkst. 16.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Andrejs Krasņikovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Ph. D. Giedrius Janušas*,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

Asociētais profesors *Dr. Sc. D. Gabriel David Weymouth*,
Sauthemptonas Universitāte, Apvienotā Karaliste

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Mārcis Eimanis..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, astoņas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 113 attēlu, četras tabulas, divi pielikumi, kopā 132 lappuse. Literatūras sarakstā ir 97 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Darbs veltīts autora izstrādātam jaunam zemūdens transportlīdzekļa piedziņas veidam. Pētīta plūsmas un transportlīdzekļa mijiedarbības dinamika, kā arī apskatīti plūsmas ietekmējoši faktori, vadības metodes un spēja pārvietoties arī citās vidēs, ne tikai šķidrumā. Izveidota piedziņas sistēmas ģeometrija, un ar speciālas *CFD* programmatūras palīdzību pētītas tās hidrodinamiskās īpašības. Izveidots vadības sistēmas matemātiskais modelis. Ar daudzķermeņu dinamikas modelēšanas programmatūru *MSC Adams* modelēta zemūdens transportlīdzekļa dinamika, ievērojot vadības sistēmu un ūdens pretestības modeli, kas izveidots ar *CFD* programmatūras palīdzību. Plūsmas dinamikas apvienošanai ar daudzķermeņu mehānisma dinamiku izmantots metamodelēšanas un skaitlisko eksperimentu paņēmieni. Skaitliskie eksperimenti irdenā jeb granulārā vidē veikti, lietojot diskrēto elementu metodi, simulējot transportlīdzekļa pārvietošanos ar programmatūru *EDEM*. Darba gaitā izveidots arī modeļa prototips modeļa uzvedības vērošanai reālos apstākļos. Iegūti kvalitatīvi, labi sakrītoši matemātiskā modeļa un fiziskā prototipa dinamikas rezultāti, kas pierāda gan jaunā piedziņas principa, gan vadības sistēmas darbaspēju.

SATURS

ANOTĀCIJA	4
DARBA vispārējs raksturojums	6
Aktualitāte	6
Darba mērķis un galvenie uzdevumi	6
Izpētes hipotēzes un pieņēmumi	7
Pētījuma novitāte	7
Pētījuma praktiskais lietojums	8
Darba aprobācija	8
1. JAUNĀ VEIDA PIEDZIŅAS PRINCIPA IZKLĀSTS.....	10
2. AUTONOMO ZEMŪDENS TRANSPORTLĪDZEKĻU APSKATS.....	11
3. MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ <i>MSC ADAMS</i>	15
3.1. Modeļa ģeometrija.....	15
3.2. Vienkāršots ūdens pretestības modelis DHAZT sistēmai	16
3.3. Plūsmas pretestības modeļa izveide	17
4. DINAMIKAS MODELĒŠANA, LIETOJOT DAŽĀDUS VADĪBAS ALGORITMUS.....	20
4.1. Helikoīdā transportlīdzekļa vadības principa izstrāde.....	20
4.1.1. Vadības algoritmu apskats	20
4.1.2. Atsauces trajektorijas ģenerēšana.....	22
4.1.3. Durbja vadāmās konstrukcijas shēma	22
4.1.4. Vidus korpusa stabilizācija.....	23
4.1.5. Vadības algoritma varianti	25
4.2. Vadības algoritms pēc virziena	25
4.3. Vadības algoritms pēc ātruma	27
5. MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ <i>EDEM</i>	29
6. MODEĻA PROTOTIPS	30
SECINĀJUMI	32
LITERATŪRA.....	34

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Aktualitāte

Mūsdienās transportlīdzekļiem, kas pārvietojas zem ūdens vai pa ūdens virsmu, ir dažādi piedziņas veidi, taču arvien vispopulārākais ir propelleru piedziņa. Propelleru piedziņa tiek izmantota gan kuģiem, laivām, gan zemūdenēm un torpēdām. Daļa no šiem transportlīdzekļiem tiek piedzīti arī ar ūdens strūkļas piedziņu, kas tāpat tiek radīta, izmantojot propellerus. Katram piedziņas veidam ir savi plusi un mīnusi, taču visbiežāk tomēr tiek izvēlēti propelleri. Darba gaitā tiek apskatīti dažādi ūdens transportlīdzekļi, to piedziņas veidi, tehniskie risinājumi un lietojuma veidi.

Plaši sastopamā propelleru tipa piedziņa tiek izmantota arī autonomiem zemūdens transportlīdzekļiem (AZT; angļu val. *autonomous underwater vehicle, AUV*). Šāds transportlīdzeklis tiek būvēts tā, lai tā darbībā nebūtu tiešas cilvēka iejaukšanās, to panākot ar speciālām vadības sistēmām, kas darbojas pēc cilvēka iepriekš izveidotiem algoritmiem. Visbiežāk AZT darbības mērķi ir paaugstinātas bīstamības vai cilvēkam grūti pieejamu (bieži nepieejamu) vietu izpēte. Šādi transportlīdzekļi darbojas pēc nelineāras dinamikas likumiem, tāpēc tiem nav konkretizētu modeļu un nākas saskarties ar traucējumiem, ko ir grūti paredzēt un nolasīt. To izveidē jāreķinās ar sarežģītām vadības sistēmas dizaina problēmām. Arī hidrodinamiskos koeficientus bieži vien nav iespējams aprakstīt pilnīgi, tāpat rodas arī nenomērāmi traucējumi straumju dēļ. [1] Tas nopietni apgrūtina AZT izveidi, taču, neskatoties uz šīm grūtībām, šādi transportlīdzekļi tiek būvēti, pilnveidoti un izmatoti gan pētniecības misijās, gan arī industrijā.

Piedziņas shēma veidota no pretējos virzienos rotējošām korpusa daļām, kas aprīkotas ar vītņiem. Ar to palīdzību objekts pats it kā “urbjas” cauri ūdenim, turklāt ar elastīgi lokāmu vidusdaļu tam ir iespēja mainīt kustības virzienu. Iedvesma izgudrojumam ir aizgūta no mikropasaules baktērijām, kas pārvietojoties izmanto rotējošas viciņas. Piedāvātā shēma atšķiras tikai ar to, ka rotācijas kustību veic arī priekšējais korpus, radot pozitīvu dzinējspēku. Šāda veida shēma būtu izmantojama autonomām bezapkalpes zemūdens transportierīcēm. Līdz šim līdzīgi korpusi, bet ar paralēli izvietotām gliemežpārvada tipa dzenskrūvēm, tika izmantoti amfībijām [2], taču lielās zemes slāņa ārdīšanas dēļ šī piedziņa nav izplatīta.

Darba mērķis un galvenie uzdevumi

Darba mērķis ir izpētīt dubulthelikoīdās piedziņas principa lietojumu zemūdens transportlīdzekļos un parādīt, ka šāda zemūdens piedziņas sistēma darbojas un ir vadāma. Lai sasniegtu mērķi, jāatrisina vairāki galvenie uzdevumi.

1. Jāveic literatūras analīze par industrijā esošo AZT piedziņas veidiem, to matemātiskajiem modeļiem, analīzes metodēm un programmatūru.
2. Jāizveido *CFD* (angļu val. *computational fluid dynamics* jeb skaitliskā hidrodinamika) programmatūrā lietojamu modeļu šķidrums plūsmas radīto spēku modelēšanai un jāveic skaitliskie eksperimenti.

3. Uz skaitlisko eksperimentu bāzes jāizveido vienkāršotu šķidrums pretestības modeli lietošanai daudzķermeņu mehānismu dinamikas programmatūrā *MSC Adams*.
4. Jāveic uz dubulthelikoīdās piedziņas principu balstīta AZT modelēšana datorprogrammā *MSC Adams*.
5. Jāizstrādā *PD* kontroliera tipa modelis uz dubulthelikoīdās piedziņas principu balstīta AZT vadīšanai.
6. Jāveic mērķa sekošanas dinamikas modelēšana ar datorprogrammu *MSC Adams*.
7. Jāizveido uz dubulthelikoīdās piedziņas principu balstīts AZT modelis diskrēto elementu programmatūrai *EDEMS* un ar to jāveic skaitliskie eksperimenti granulāras vielas vidē.
8. Jāizveido uz dubulthelikoīdās piedziņas principu balstīts AZT prototips, tā konstruēšanā izmantojot *SolidWorks* programmatūru, sarežģītāko elementu izgatavošanā izmantojot modernās ražošanas tehnoloģijas, piemēram, 3D drukāšanu.
9. Jāveic eksperimenti ar prototipu un jāvalidē modelēšanas rezultāti.
10. Jāizdara secinājumi un jānosaka turpmākā darba virzieni.

Izpētes hipotēzes un pieņēmumi

1. Pieņemts, ka dubulthelikoīdais piedziņas princips ir jauns – zinātniskajā literatūrā nav apskatīts un līdz šim tehnikā nav realizēts, ir izmantojams, vadāms un efektīvs.
2. Pieņemts, ka ūdens ir nespiežams šķidrums, ūdens un mehānisma elementu mijiedarbība izpaužas kā formas pretestības un virsmas berzes spēki.
3. Pieņemts, ka dubulthelikoīdās piedziņas principa sistēma pārsniedz šādai sistēmai noteikto Reinoldsa skaitļa robežvērtību, tādējādi radot turbulentu plūsmu.
4. Pieņemts, ka modernā *CFD* programmatūra ir lietojama aproksimētu ūdens pretestības modeļu jeb metamodeļu iegūšanai, ko var lietot tādā daudzķermeņu mehānikas dinamikas programmatūrā, kas pati veido Ņūtona–Eilera dinamikas modeļus, lietojot mehānisma kinemātiskās shēmas aprakstu.
5. Pieņemts, ka diskrēto elementu metode un tās attiecīgā programmatūra pietiekami precīzi apraksta beramas vides daļiņu savstarpējo mijiedarbību un mijiedarbību ar mehānisma elementiem.

Pētījuma novitāte

Darbā apskatīti aktuālie un jaunie zemūdens transportlīdzekļi un roboti, to dažādie izpildījumi, kas neaprobežojas tikai ar propelleru radītu piedziņas spēku. Piedāvātais dubulthelikoīdais piedziņas princips ir pilnībā jauns un inovatīvs, un tā konstruktīvais risinājums līdz šim tehnikā nav realizēts. Piedziņas dizaina izstrādē ir gūta iedvesma no dabas, konkrētāk – no mikropasaules baktērijām, tādējādi ir izmantota arī biomimikrijas metodika.

Rezultātu ieguvei izmantotas modernas, komerciāli pieejamas datorprogrammas, kas ļauj rezultātus apskatīt telpā un laikā. Pilnīgākai matemātiskā modeļa izveidei šīs programmatūras tika kombinētas, izmantojot metamodelēšanas un atbildes virsmas metodiku. Fluīda

mijiedarbības noteikšanai tika izmantota *CFD* programmatūra, no kuras iegūtie dati pēc tam tika izmantoti modeļa izveidē daudzķermeņu simulēšanas programmatūrā *MSC Adams*.

Pētījuma praktiskais lietojums

1. Dubulthelikoīdo piedziņas principu var izmantot autonomos zemūdens transportlīdzekļos, kas varētu veikt dažādas operācijas cilvēkam sarežģītā vai pat bīstamā zemūdens vidē, sākot ar vides monitoringu līdz, piemēram, paraugu ievākšanai no paša veiktā urbuma gultnē un ekoloģijas uzturēšanai vidē.
2. Konstruktīvais izpildījums ļauj pārvietoties arī pa cauruļvadiem, piemēram, diagnosticēt aizsprostojumu un to attīrīt. Pateicoties simetriskajam dizainam, transportlīdzeklī nav nepieciešams veikt apgriešanos, lai ar tādu pašu efektivitāti veiktu ceļu atpakaļ.
3. Mikroizmēros ierīce ar dubulthelikoīdo piedziņas principu varētu pārvietoties pa cilvēka vai dzīvnieka asinsvadiem, lai veiktu medicīniskas manipulācijas vai piegādātu zāles konkrētā problēmas punktā.
4. Transportlīdzekļa amfībijas īpašības tam ļauj radīt dzinējspēku un pārvietoties irdenā cietvielā vai granulētā vidē. Aprīkojot ar nepieciešamajiem sensoriem, tas varētu pārvietoties, piemēram, pa graudu uzglabāšanas konteineri, veidot iekšējās vides monitoringu. Līdzīgi tas būtu lietojams arī glābšanas darbos iežu vai sniega nogrūvos, lai atrastu iesprostotos cietušos.
5. Ar speciāli konfigurētu konstrukciju transportlīdzeklī ar dubulthelikoīdās piedziņas principu ir potenciāls arī pazemes tuneļos, kuros paredzēts izvietot kabeļu līnijas, rakšanā.

Darba aprobācija

Recenzēts zinātniskais raksts, kas publicēts Latvijā vai ārzemēs izdotos zinātniskos žurnālos, tajā skaitā augstskolu izdevumos

1. **Eimanis M.**, Auzins J. Method and Device for Production of Driving Force in Underwater Floating Vehicle. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2021, Vol. 14 (2), pp. 175–183, ISSN: 2212-7976, doi: 10.2174/2212797613999200930163030.

Publikācijas konferenču materiālos, kas indeksēti *Web of Science* un/vai *SCOPUS*

1. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Research of the Dynamics of Double Helicoidal Vehicle in Granular Media. No: 18th International Scientific Conference “*Engineering for Rural Development*”: Proceedings. Vol. 18, Latvija, Jelgava, 22.–24. maijs, 2019. Jelgava:

LLU, 2019, 1205.–1209. lpp. ISSN 1691-5976. Pieejams: doi: 10.22616/ERDev2019.18.N358.

2. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Flow Analysis of New Type Propulsion System for UV's. No: IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, Latvija, Rīga, 27.–29. septembris, 2017. UK: IOP Publishing, 2017, 1.–9. lpp. ISSN 1757-8981. e-ISSN 1757-899X. Pieejams: doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012059.
3. Auziņš, J., **Eimanis, M.** Dynamical Simulation and Optimization of Double-Helical AUV. No: MARINE 2015 : *Computational Methods in Marine Engineering VI*, Italy, Rome, 15.–17. jūnijs, 2015. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2015, 1128.–1139. lpp. ISBN 978-84-943928-6-3.

Citas publikācijas konferenču (arī vietējo) ziņojumu izdevumos

1. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Flagella Inspired Propulsion for AUVs. No: *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'16*, Italy, Cortona, 17.–19. oktobris, 2016. Cortona: 2016, 342.–354. lpp.
2. **Eimanis, M.**, Auziņš, J. Jauna veida zemūdens transportlīdzekļu piedziņas izstrāde. No: *Teorētiskā mehānika: 53. RTU studentu zinātniskās un tehniskās konferences rakstu krājums*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2012, 311. lpp. ISBN 978-9934-10-380-3.

Patenti

1. LV15296B, Jānis Auziņš, **Mārcis Eimanis**, Vitālijs Beresņevičs, Guntis Kuļikovskis. IERĪCE UN PAŅĒMIENS ZEMŪDENS PELDLĪDZEKĻA DZINĒJSPĒKA RADĪŠANAI. Piešķirts 20.03.2018.
2. LVP2021000027, Jānis Auziņš, **Mārcis Eimanis**. IERĪCE UN PAŅĒMIENS, KAS RADA DZINĒJSPĒKU GRANULĀRĀ VAI IRDENĀ CIETVIELU VIDĒ. Iesniegts 05.05.2021.

Dalība starptautiskās konferencēs ar referātiem

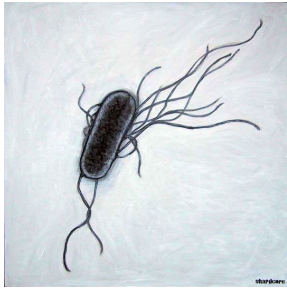
1. Engineering for Rural Development 2019. International Scientific Conference 22.–24 May 2019. Jelgava, Latvia.
2. 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017) 27–29 September 2017, Riga, Latvia
3. 10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles – “Technologies for the Ship of the Future” (HIPER'16), 17–19 October 2016, Cortona, Italy.

Apbalvojumi

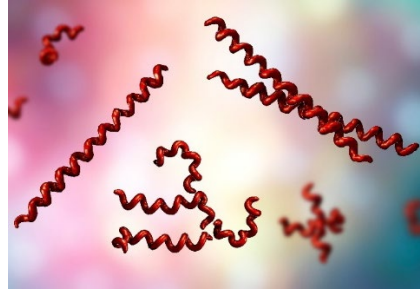
1. Trešās vietas apbalvojums 6. starptautiskajā izgudrojumu un inovāciju izstādē “*MINOX 2016*”, 7.–8. oktobris, 2016.

1. JAUNĀ VEIDA PIEDZIŅAS PRINCIPA IZKLĀSTS

Pētnieku uzmanību pievērsuši mikrobioloģiskie organismi, pētot salmonellas baktērijas, tām konstatēts rotācijas dzinējs. *Escherichia coli* (*E. coli*) un *Salmonella typhimurium* baktērijās to dzenošā viciņa rotē ar 18 000 apgr./min (1.1. att.), stumjot tās uz priekšu ar 30 μm/s lielu ātrumu.



(a)



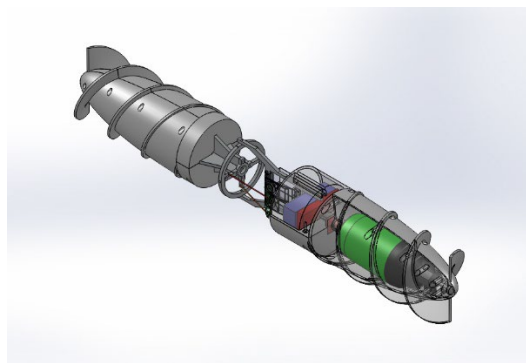
(b)

1.1. att. (a) *Escherichia coli* baktērija ar viciņām [3]; (b) spirālveida baktērijas *Spirochaetes* [4].

Pētījuma gaitā tiek modelēts un veidots jauns zemūdens transportlīdzekļu vadāms piedziņas veids, kas darbojas uz darbības un pret darbības principu. Tā piedziņa balstās uz korpusiem ar vītnēm, kas būtībā ir kā propelleri. Pētītajai piedziņai piešķirts apzīmējošs termins “helikoīda piedziņa” jeb “helikoīds”. Tas sasaucas uz grieķu valodas terminu *helico-*, kas latviešu valodā nozīmē *spirāl-*, t. i., spirālveida piedziņa. Transportlīdzeklim ar šādu piedziņas konstrukciju piešķirts nosaukums **Durbis**.

Durbja piedziņas izveidē tika izmantots biomīmikrijas princips – ietverot daudznazaru aktivitātes, tiek atdarināts dabā sastopams objekts, lai risinātu sarežģītu inženierproblēmu [5] [6], jo gūtā iedvesma piedziņas idejai nākusi no mikropasaules baktērijām, konkrēti – no 1.1. attēlā redzamajām *E. Coli* un *Spirochaetes*.

Modelis ir plānots kā autonomas bezapkalpes aparāts, kam netraucē tas, ka visas daļas rotē. Šādam autonomam zemūdens aparātam ieviests nosaukums dubulthelikoīdais autonomais zemūdens transportlīdzeklis jeb DHAZT. Durbja modelis redzams 1.2. attēlā.

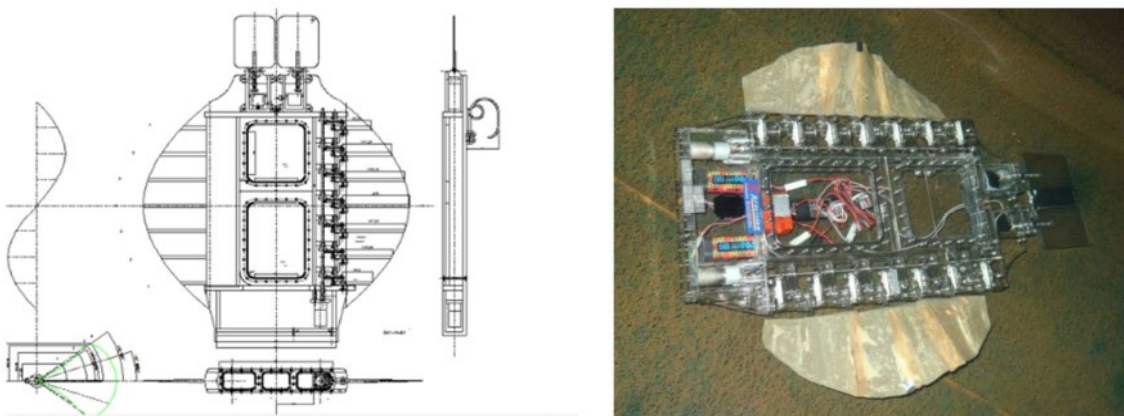


1.2. att. Durbja modeļa attēlojums programmā *SolidWorks*.

2. AUTONOMO ZEMŪDENS TRANSPORTLĪDZEKĻU APSKATS

Tā pat kā Durbim, arī citos autonomo zemūdens transportlīdzekļu jeb AZT risinājumos iedvesma visbiežāk gūta no dabā sastopamajiem organismiem. Šajā nodaļā apskatīti dažādi līdz šim izstrādāti un vēl izstrādes procesā esoši AZT.

Vistiešākā veidā no zemūdens dzīvnieku pasaules ir iedvesmojušies Osakas Universitātes (Japāna) zinātnieki, kur tiek izstrādāts zemūdens robots, kam formas un uzbūves iedvesma ir gūta no kalmāriem. Robots (2.1. att.) kopumā ir veidots plakans ar sānos izvietotām spurām, kas, izpildot viļņveida kustības, rada dzinējspēku. [7]



2.1. att. Kalmāra tipa robots un tā shematisks attēlojums. [7]

Mehānisms, ar kura palīdzību spura veido dzinējspēku, darbojas pēc divdimensiju viļņveida kustības likuma. Pieņemot, ka viļņa garums ir $\frac{1}{3}$ m un frekvence 1 Hz, vienādojums ir šāds:

$$y = 0,05 \sin(2\pi kx - 2\pi ft) = 0,05 \sin 2\pi k(x - ct), \quad (2.1.)$$

kur:

x – virziena koordināta spuras garuma virzienā;

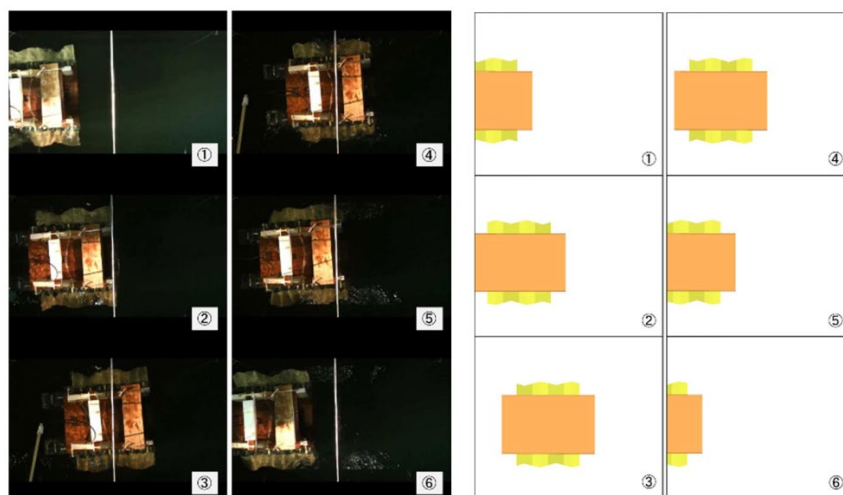
y – pārvietojums vertikālā virzienā;

k – viļņu skaits 3 1/m;

f – frekvence 1 Hz;

c – viļņa fāzes ātrums $\frac{1}{3}$ m/s.

Ar šo robotu ir veikti vairāki eksperimenti, kuros pārbaudīta tā veiktspēja, kā arī pārbaudīta tā matemātiskā modeļa atbilstība reālās dabas eksperimentiem. Piemēram, vienā no eksperimentiem tika pārbaudīta arī spēja nobremzēt. Šeit, kā redzams 2.2. attēlā, un arī citos eksperimentos iegūtie dati uzrāda labus rezultātus – robots, piemēram, ir spējīgs strauji apstāties un mainīt kustības virzienu. [7]



2.2. att. Robota spējas nobremzēt salīdzinājums ar matemātisko modeli (spuru frekvence 0,75 Hz). [7]

Sauthemptonas Universitātē (Apvienotā Karaliste) tika apskatīti vairāki iegremdēti ķermeņi, kas fluīda spēku radīšanai krasi izmaina savu ķermeņa formu. To skaitā ir relatīvi vienkāršas formas izmaiņas, piemēram, ātri izmainīts spuru/spārniņu virziens, lai izpildītu tūlītēju apstāšanos, vai arī tandēmā vicināti spārniņi, kas rada dzinējspēku, kas ir trīs reizes lielāks par vidējo, nekā tas, kas iegūts no viena spārniņa vicināšanas. To skaitā ir arī vairākas netradicionālas formas maiņas, piemēram, ķermeņi, kas ļoti ātri saraujas, lai izpildītu griešanās vai ieniršanas manevrus.

Šādas metodes piemērs dabā ir galvkāji (kalmāri, astoņkāji). Tie ievērojami palielina savus izmērus, piepildot sevi ar ūdeni, tad izgrūž to, veidojot spēcīgu reaktīvu strūklu, pēc tam samazinot atpakaļ savus izmērus līdz sākotnējiem, un tas tiem palīdz strauji pazust no esošās atrašanās vietas [8]. Astoņkājiem līdzīgie transportlīdzekļi, kas veidoti pēc mīksto audu robotikas tehnoloģijas, izplūdes brīdī mēdz sarauties no lodes formas uz 5 : 1 elipsoīdu. Paātrinājumu šādiem objektiem aprēķina ar šādu vienādojumu:

$$\ddot{x} = \frac{F - \dot{m}U_j}{m} = \frac{\Sigma F}{m}, \quad (2.2.)$$

kur:

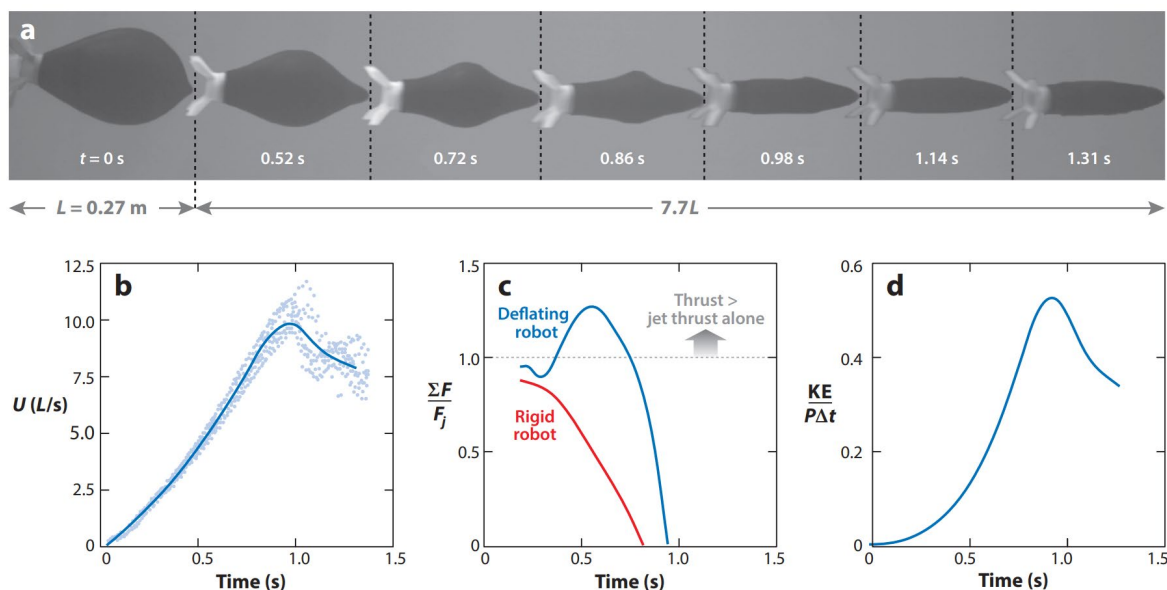
ΣF – summārais spēks, kas ir fluīda spēks plus strūklas dzinējspēks $T_j = -\dot{m}U_j$;

$-\dot{m}$ – masas samazinājuma ātrums;

U_j – strūklas izejas ātrums [5].

Simulāciju rezultāti uzrādīja, ka šādi ķermeņi spēj sasniegt ātrumus, kas pārsniedz $3,5U_j$. 2.3. a attēlā redzams šī transportlīdzekļa prototips, kas veidots no mīkstas membrānas ar iekšpusē ietvertu cietu konstrukciju. Līdzīgi kā astoņkāja apvalks, šī membrāna var tikt piepūsta ar šķidrumu, liekot tai ieņemt sākotnēji lielu, trulu formu, tādā veidā uzglabājot pietiekamu enerģijas daudzumu, lai panāktu savu straujo aizsaušanos.

2.3. attēlā redzams šī robota pašpiedzītais straujais paātrinājums un izlāde. Ātrums pārsniedz 10 L/s jeb 2,7 m/s aptuveni pēc $t = 0,95$ s pēc palaišanas. [9]



2.3. att. Astonkājīm līdzīgā transportlīdzekļa rezultāti pēc pašpiedziņas testa. [10]

Iepriekš aprakstītajam transportlīdzeklī ir viena ļoti būtiska īpašība, kas sakrīt ar Durbi – transportlīdzekļa korpusu kalpo dzinējspēka radīšanai. Un, kā šeit redzams, ar šādu metodi ir iegūstami ievērojami rezultāti, kas ietver gan energoefektivitāti, gan dinamisko sniegumu.

FILOSE projektā, kurā piedalījās arī Rīgas Tehniskās universitātes Mehānikas institūts, tika izstrādāta robotzivs (2.4. att.) ar gumijotu astes daļu. Robota forma ir veidota pēc varavīksnes foreles līdzības. Šeit arī pats korpusu pilda dzinējspēka radīšanas funkciju, vismaz 2/3 no tā – purna daļa (galva) – ir no cieta materiāla, kurā ir izvietota vadības sistēma, savukārt astes daļa ir elastīga, kas ar krūškurvī novietota servomotora mehānismu palīdzību veic viļņveida kustības, radot dzinējspēku kustībai ūdenī. [11]



2.4. att. *FILOSE* zivs robota prototips. [11]

Savukārt ar samērā vienkāršu divu spārnu propelleri tiek piedzīts *AZT Explorer* (2.5. att.), ko izstrādājusi kompānija *ISE (International Submarine Engineering Ltd.)* jeb Starptautiskā Zemūdens inženierija. Šis ir viens no tradicionālākajiem AZT tipiem, kas šobrīd ir pieejams un tiek izmantots industrijā. Slapjie kravas nodalījumi, kuru diametrs ir 69 cm, spēj ietilpināt plašu sānu skenēšanas sonāru klāstu, kā arī daudzstaru akustiskos skenerus un daudzus citus rīkus ūdens kolonnas parametru noteikšanai. [12], [13]

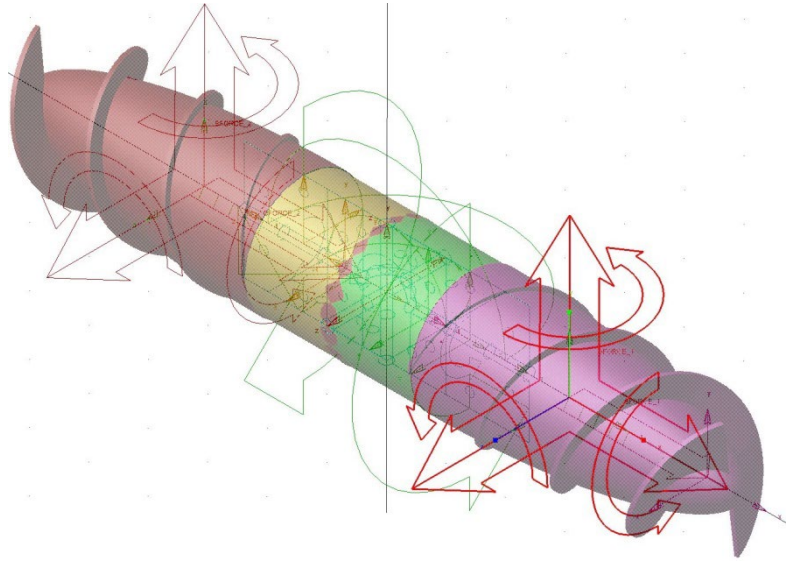


2.5. att. *ISE Explorer* autonomais zemūdens transportlīdzeklis. [13]

3. MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ *MSC ADAMS*

3.1. Modeļa ģeometrija

Lai analizētu Durbja ģeometrijas shēmas uzvedību ar lokāmu viduskorpusu, tika izveidots matemātiskais modelis programmā *MSC Adams*, kas redzams 3.1. attēlā. Vītņu ģeometrija ir iepriekš izveidota un importēta programmā *SolidWorks*.



3.1. att. *MSC Adams* matemātiskais modelis.

Tas veidots tā, lai tam būtu visas tās pašas brīvības pakāpes, kā paredzētajam modelim. Viduskorpuss sastāv no sfēras un diviem cilindriem, kas savā starpā savienoti ar kustīgiem šarnīriem. Pie cilindriem pievienoti vītņkorpusi, kas spēj veikt rotāciju, kā paredzēts reālajam mehānismam. Modelim tādējādi ir 10 brīvības pakāpes. Vadības principa pārbaudei tika izveidots ūdens pretestības metamodelis [14], kurā pieņemts, ka uz transportlīdzekļa sastāvdaļām (vidusdaļu, priekšgalu un aizmuguri) darbojas pretestības spēki un momenti, kas ir proporcionāli lineārā un leņķiskā ātruma kvadrātiem. Attiecīgās pretestības koeficientu vērtības tika atrastas, lietojot programmu *Flow3D* ar plūsmā iestiprinātām Durbja sastāvdaļām. Modelis tika veidots tikai tāpēc, lai pārbaudītu transportlīdzekļa veiktspēju un manevrējamību. Tajā netika ņemti vērā šādi parametri:

- pievienotās masas efekts;
- virsmas berze;
- plūsmas izmaiņas uz aizmugurējo korpusu, kamēr transportlīdzeklis ir saliektā stāvoklī.

3.2. Vienkāršots ūdens pretestības modelis DHAZT sistēmai

Tālāk tiks apskatīts vienkāršots ūdens pretestības modelis DHAZT sistēmai. Uz katru DHAZT komponenti darbojas griezes moments, kas izsakāms kā:

$$T = K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4, \quad (3.1.)$$

kur:

K_T – dzinējspēka koeficients;

ρ – ūdens blīvums (kg/m^3);

n – rotācijas frekvence (apgr./s);

D – vītnes diametrs (m).

Veicot pārveidojumus, šis vienādojums pierakstāms kā:

$$T = k \cdot \omega, \quad (3.2.)$$

kur:

k – pretestības spēka koeficients;

ω – rotācijas ātrums (rad/s).

Piešķirot korpusiem koeficientus: 1 – priekšgals, 2 – vidus korpus, 3 – aizmugurējais korpus, katrai daļai tiek sastādīta x, y, z koordinātu sistēma ar attiecīgo koeficientu, kas aizstāts ar i . No tā izriet:

$$\begin{aligned} TF_{xi} &= K_{Txi} \cdot \omega_{xi}^2 = K_{Txi} \cdot \omega_{xi} \cdot \|\omega_{xi}\| \\ TF_{yi} &= K_{Tyi} \cdot \omega_{yi}^2 = K_{Tyi} \cdot \omega_{yi} \cdot \|\omega_{yi}\| \\ TF_{zi} &= K_{Tzi} \cdot \omega_{zi}^2 = K_{Tzi} \cdot \omega_{zi} \cdot \|\omega_{zi}\| \end{aligned} \quad (3.3.)$$

Līdzīgi izsakāms arī pretestības spēks uz korpusiem:

$$F = k \cdot v^2 = k \cdot v \cdot \|v\| \quad (3.4.)$$

3.4. vienādojums izvērsts koordinātu sistēmā:

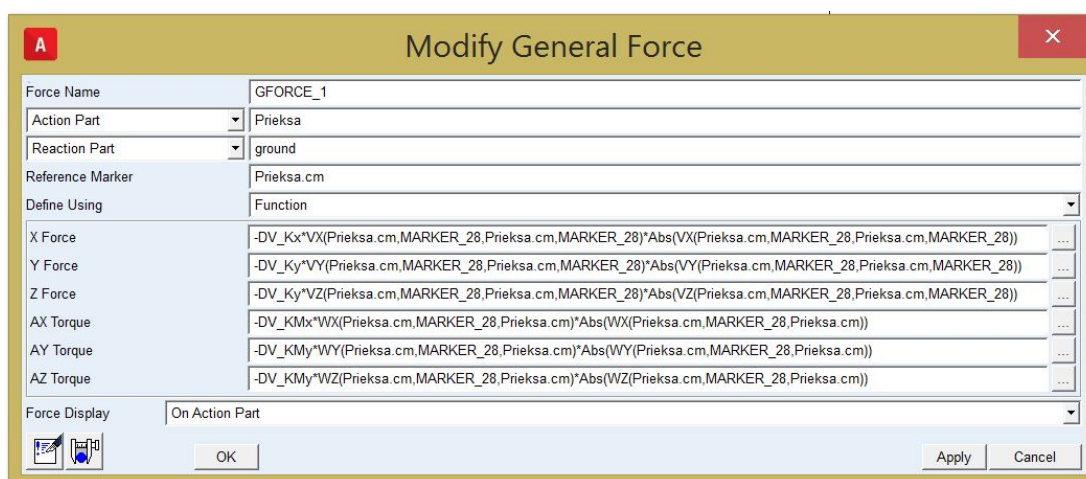
$$\begin{aligned} F_{xi} &= k_{xi} \cdot v_{xi}^2 = k_{xi} \cdot v_{xi} \cdot \|v_{xi}\| \\ F_{yi} &= k_{yi} \cdot v_{yi}^2 = k_{yi} \cdot v_{yi} \cdot \|v_{yi}\| \\ F_{zi} &= k_{zi} \cdot v_{zi}^2 = k_{zi} \cdot v_{zi} \cdot \|v_{zi}\| \end{aligned} \quad (3.5.)$$

Garenvirzienā darbojas x ass, savukārt y un z ass komponentes, ņemot vērā to, ka ķermeņi ir simetriski, ir vienādas. No vienādojumiem secināms, ka ir nepieciešami četri koeficienti – garenvirzienā un perpendikulārā virzienā pretestības spēkam un momentam. Priekšdaļai un

aizmugurējai daļai šie koeficienti ir vienādi, kā arī divi koeficienti ir vidusdaļai. Šos koeficientus iespējams noteikt ar plūsmas dinamikas simulāciju programmā *Flow3D*.

3.3. Plūsmas pretestības modeļa izveide

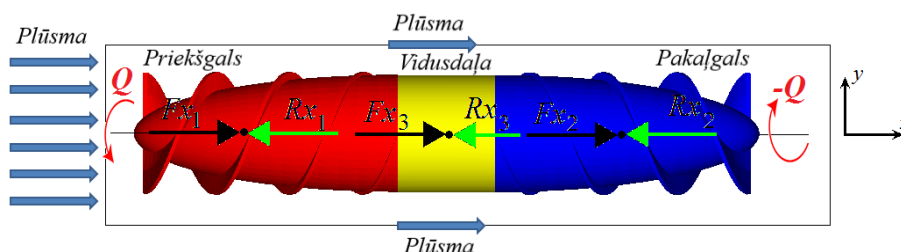
Kā iepriekš minēts, tiek lietots skaitliskajos eksperimentos iegūts plūsmas pretestības metamodelis, kurā kustības ātruma un leņķātruma vektori tiek projicēti uz kustīgo koordinātu sistēmu. Šīs projekcijas uz priekšgalu redzamas 3.2. attēlā. Analogiski vienādojumi izveidoti arī aizmugurējam korpusam.



3.2. att. Plūsmas metamodela spēku projekcijas uz priekšgalu.

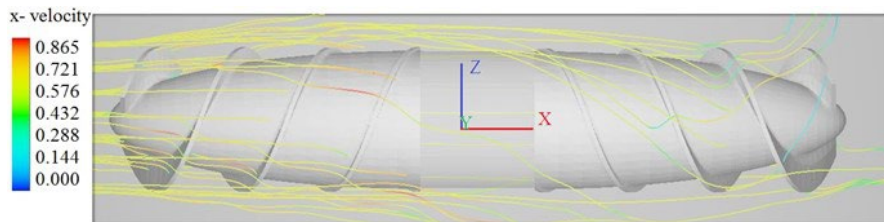
Šo vienādojumu sākumā ietverti pretestības koeficienti, kas tika aprēķināti ar *Flow3D*. Tie ir ātruma kvadrātam proporcionāli pretestības spēku koeficienti, kas iegūti, modelējot rotējošu, plūsmā nekustīgi iestiprinātu Durbī. Tika lietoti dažādi plūsmas ātrumi un Durbja orientācijas. Lai modelis nekļūtu pārāk komplicēts, pagaidām nav ievēroti efekti no Durbja izlieces. Šajā plūsmas pretestības metamodelī aktuālākās ir garenvirzienā vērstās spēku un momentu reakciju komponentes. Lai pieņemtu, ka modelētā kustība ir vienlīdzīga transportlīdzekļa peldēšanai ar konstantiem piedziņas momentiem $q_1 = q_2 = Q$, ir nepieciešams, lai reakcijas spēku summas vērtība garenvirzienā būtu vienāda ar nulli (3.3. att.):

$$R_{x1} + R_{x2} + R_{x3} = 0 \quad (3.6.)$$

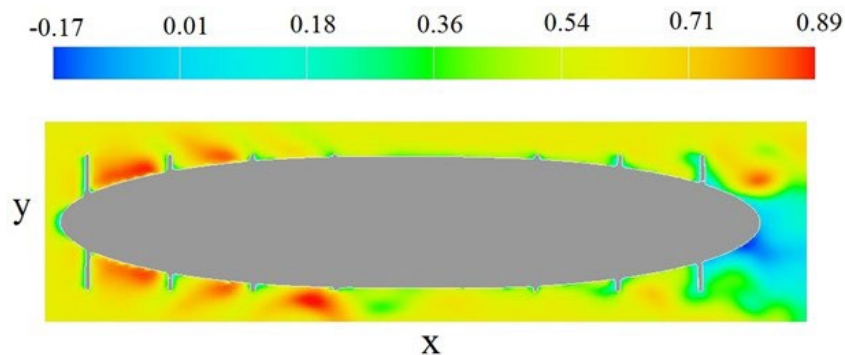


3.3. att. Durbja galīga tilpuma aprēķins domēnā (skats no augšas) programmā *Flow3D*.

3.4. un 3.5. attēlā ir redzamas fluīda plūsmas līnijas un plūsmas horizontālā ātruma kontūri pie plūsmas ātruma 0,6 m/s.



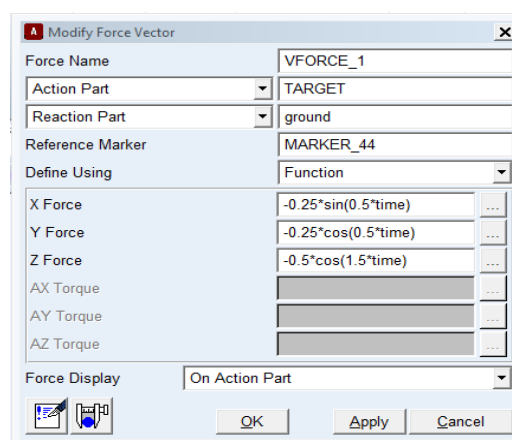
3.4. att. Fluīda plūsmas līnijas ap Durbi pie plūsmas ātruma 0,6 m/s.



3.5. att. Fluīda ātruma kontūri vidus šķērs griezuma x - y plaknē.

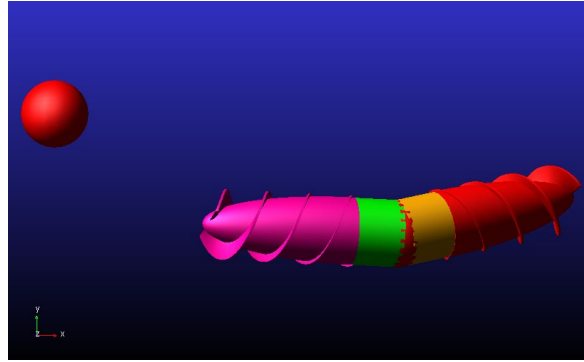
Programma ļauj Durbi iestiprināt dažādās pozīcijās, kā arī grozīt modelēšanas laikā, kas ļauj izmērīt pretestības spēku galveno vektoru un momentu. Pēc šiem skaitliskajiem eksperimentiem ar kvadrātisko aproksimāciju pēc lineārā un leņķiskā ātruma tika iegūti maināmie koeficienti, piemēram, DV_Kx un DV_KMx .

Pēc ūdens pretestības modeļa izveidošanas matemātiskajam modelim tiek pievienots trīsdimensionālā telpā kustīgs mērķis, kam pielikts pēc sinusoidāla likuma mainīgs spēks $x(t) = -0,25\sin(0,5t)$, $y(t) = -0,25\cos(0,5t)$, $z(t) = -0,5\cos(1,5t)$, kas to virza (3.6. att.).



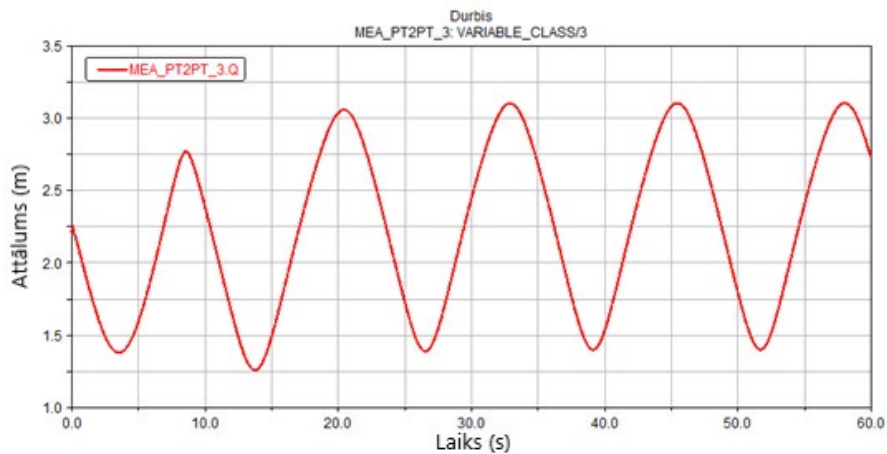
3.6. att. Mērķa kustības spēka funkcijas.

3.7. attēlā redzama modeļa sistēma ar sasniedzamo mērķi.

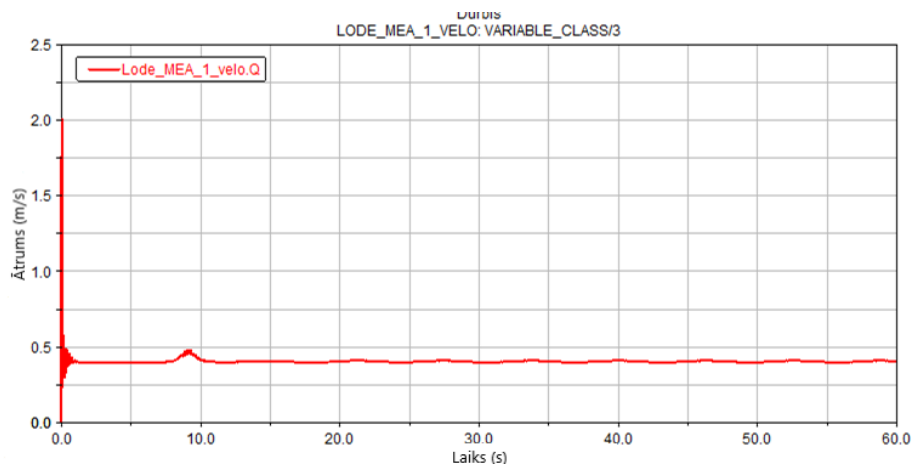


3.7. att. Transportlīdzeklis ar izsekojamo mērķi.

Sākuma stāvoklī transportlīdzeklis atrodas nesaliekātā stāvoklī, bet, sākoties simulācijai, tas laika momentā ieņem virzienu un iesāk kustību uz mērķi. Transportlīdzekļa ātrums mērķa panākšanas laikā būtiski nemainās un, kā redzams 3.9. attēlā, tas ir robežās konstants. Līdzīgi notiek ar attālumu līdz mērķim. Laika gaitā, apmēram no 20. sekundes (3.8. att.), attāluma izmaiņa ieņem vienu amplitūdu, kas nozīmē, ka transportlīdzeklis diezgan stabili seko mērķim.



3.8. att. Transportlīdzeklis attālums līdz mērķim.



3.9. att. Transportlīdzekļa sekošanas mērķim ātrums.

4. DINAMIKAS MODELĒŠANA, LIETOJOT DAŽĀDUS VADĪBAS ALGORITMUS

Durbja dinamikas modelēšana norisinājās datorprogrammā *MSC Adams*. Modeļa sistēmai tika pielikti un definēti plūsmas videi raksturīgi spēki, un komponentēm – kustības likumi, kas apraksta iepriekš aprakstītos vadības algoritmus.

4.1. Helikoīdā transportlīdzekļa vadības principa izstrāde

4.1.1. Vadības algoritmu apskats

Nodaļā apskatīti vairāki vadības algoritmi, piemēram, vadība pēc virziena, vadība pēc ātruma un kinemātiskā vadība, trajektoriju plānošana. Ņemot vērā vides apstākļus, kurā jāoperē transportlīdzeklī, kā arī pēc paša transportlīdzekļa tehniskajiem raksturlielumiem, izvēlas piemērotāko vadības veidu.

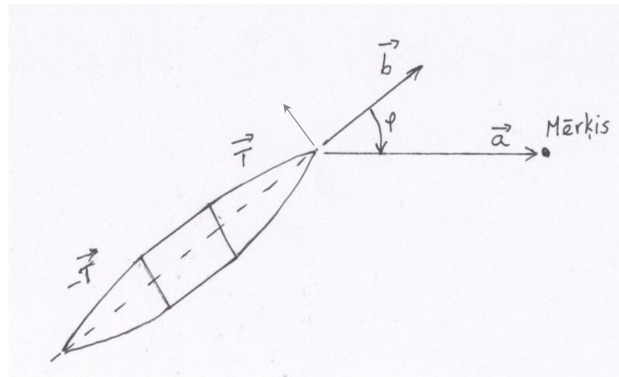
Vadībā pēc virziena objekta uzdevums ir ieņemt kustības virzienu uz mērķi. 4.1. attēlā redzamais vektors b ir objekta virzības virziens, vektors a – objekta ieņemamais virziens, leņķis φ – šo vektoru leņķiskā starpība, k – korekcijas koeficients. Šie lielumi saistāmi ar griezes momenta sakarību vispārējā formā:

$$\vec{T} = k(\vec{a} \times \vec{b}) = \frac{k^*}{\|a\| \|b\|} \cdot \vec{a} \times \vec{b} \quad (4.1.)$$

Operējot ar griezes momentu, būtu iespējams piedzīt objekta vektoriālo virzienu, iegūstot vēlamo virzienu mērķa sasniegšanai jeb sekošanai. Vadības dzinēji rada iekšējo spēku momentu. 4.1. izteiksme attiecas uz transportlīdzekļa priekšdaļu. Uz aizmugures daļu tādējādi darbosies pretēji vērsts spēku moments $-\vec{T}$. Abu vadības dzinēju radītā spēku momenta lielums (vektora norma) būs:

$$\|\vec{T}\| = k\|a\| \cdot \|b\| \cdot \sin(\varphi) \quad (4.2.)$$

Algoritma mērķis ir uzturēt minimālu vektoru savstarpējo novirzi, φ tuvinās 0 vērtībai. Šī metodika labi darbotos apstākļos, kur nav ārējo spēku iedarbības, piemēram, upes straumes plūsma.

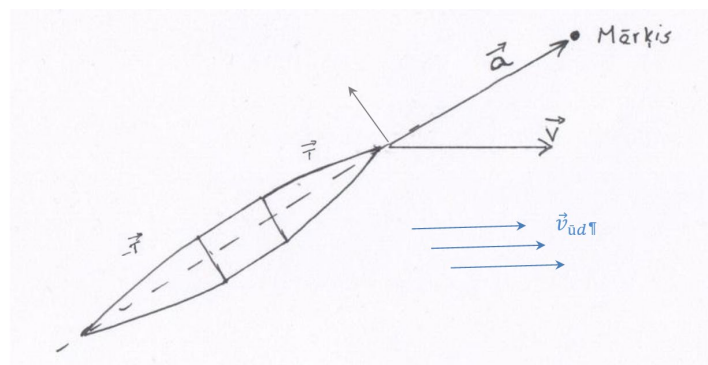


4.1. att. Virziena vadības shematisks attēlojums.

Vadības algoritmā pēc ātruma princips mazliet atšķiras. Objekta centrālās ass virziens var nesakrist ar ātruma v virzienu, ko ietekmē kāds ārējs faktors, piemēram, straume. Šis algoritms būs veiksmīgi izmantojams gadījumos, kad straumes virziens sakrītīs ar ātruma v vektoru (4.2. att.).

Algoritms aprakstāms ar griezes momenta \vec{T} sakarību:

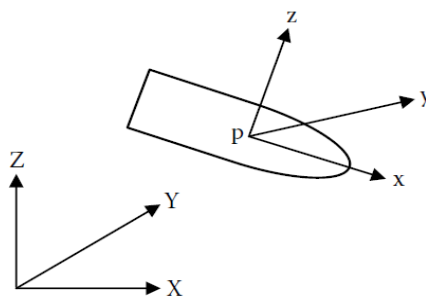
$$\vec{T} = \frac{k}{\|a\|\|v\|} \cdot \vec{v} \times \vec{a} \quad (4.3.)$$



4.2. att. Ātruma vadības shematisks attēlojums.

Sistēmas kinemātiskā modeļa vienādojumi neietver faktiskos spēkus, kas izraisa kustību, un transportlīdzekļa dinamiskās īpašības. Šis modeļa tips atļauj nošķirt transportlīdzekļa dinamiku no tā kustības. Praktiski gan dzinēja griezes moments, gan pagrieziena leņķis vai ātrums tiek realizēti ar nobīdi laikā. Tas nozīmē, ka dzinēja pagrieziens laika momentā t atbilst transportlīdzekļa orientācijai laika momentā $t-\Delta$, kur Δ – laika nobīde. Modelējot šādas sistēmas ar universālajām daudzķermeņu sistēmu simulācijas programmām, var rasties simulācijas nestabilitāte, jo dzinēja pagrieziens ir atkarīgs no orientācijas, un tā savukārt atkarīga arī no dzinēju pagrieziena. Šī nestabilitāte nenozīmē fizisko vadības sistēmas nestabilitāti, bet tā nav izslēgta.

Zemūdens transportlīdzekļa kinemātiskā modeļa aprakstīšanai tiks izmantotas ortogonālas koordinātu sistēmas – globālas koordinātas (O, X, Y, Z) un lokālas koordinātas (p, x, y, z), kā redzams 4.3. attēlā.



4.3. att. Zemūdens transportlīdzekļa koordinātu sistēmas.

Transportlīdzekļa kinemātika tiek izskaidrota ar sešiem stāvokļa mainīgajiem un četriem ieejas mainīgajiem. Kinemātiskajām sakarībām, kas apraksta divu koordinātu sistēmu transformācijas, var būt vairākas parametrizācijas. Šeit tiek izmantota Eilera leņķu parametrizācija [15]. Eilera leņķu attēlojumā inerciālās un lokālās koordinātu sistēmas orientācija tiek izteikta ar trīs rotāciju sekvenci – velšanās Φ , slīpums θ un novirze no kursa ψ , attiecīgi ap x , y un z asīm.

Izsakot dažādus lielumus un veicot dažādas transformācijas, iegūta kinemātiskā modeļa vispārinātā forma:

$$\dot{q} = G(q)v \quad (4.4.)$$

Iepriekš aprakstītie vienādojumi ir sistēmas kinemātiskajam modelim. Sistēma ir nelineāra un nav sekojoša patvaļīgai trajektorijai vektorālajā telpā, kas nozīmē to, ka sistēmas ieejas faktoru skaits ir mazāks par tās stāvokļu skaitu. Vispārinātais ātruma vektors \dot{q} nevar pieņemt nekādas neatkarīgas vērtības. [1]

4.1.2. Atsauces trajektorijas ģenerēšana

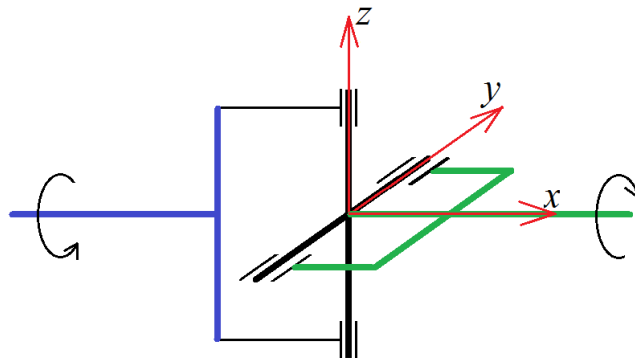
Iepriekš aprakstītais vadības algoritms var tikt klasificēts kā vadība no punkta uz punktu vai sekošana kustīgam mērķim. Augstāka līmeņa vadības sistēmas iekļauj arī trajektorijas plānošanu [1], piemēram, šķēršļu apiešanu un mērķa kustības prognozēšanu. Šā līmeņa vadības algoritmi šajā darbā netiks aplūkoti.

4.1.3. Durbja vadāmās konstrukcijas shēma

Durbja vadāmībai tika izmantots vadāmības princips, kas ir līdzīgs dzinēja pagriešanas principam, tikai Durbja gadījumā tiek pagriezti vītņotie korpusi, precīzāk, tikai priekšējais, ar kura palīdzību mainās priekšgala piedziņas spēka virziens. Te gan jāatzīmē, ka algoritms paredz pagrieziena dzinēju korekciju, lai panāktu priekšgala kustību vajadzīgajā virzienā. Taču virziena dzinēji rada iekšējus momentus, tāpēc pakalējais gals griezīsies pretējā virzienā. Abu daļu pagriezieni nebūs vienādi, jo ūdens pretestība uz tiem ir dažāda.

Šis princips tiek panākts ar lokāma vidus korpusa palīdzību, kurā locīšanas procesu visos nepieciešamajos virzienos veic kardāna tipa konstrukcija. Šai konstrukcijai pielīdzināma

krustiņa tipa koordinātu sistēma, kur locīšanas šarnīri ir ap y un z asīm, kā redzams 4.4. attēlā. Ja piedziņas vītņkorpusem tiek pielikti griezes momenti \vec{T} , tad uz priekšējo daļu darbojas moments $Q_y y - Q_z z$.



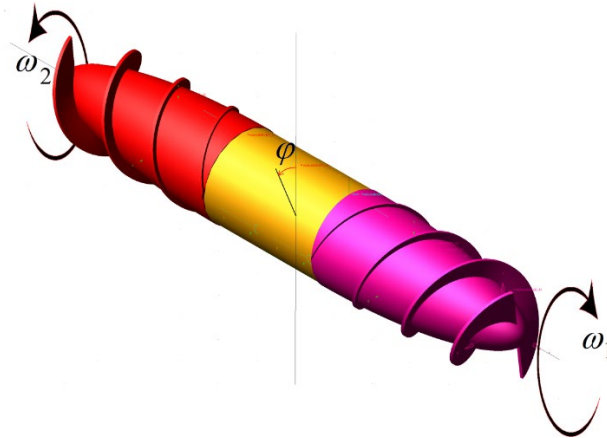
4.4. att. Krustiņa koordinātu sistēma.

Pieņemot, ka \vec{a} ir mērķa koordinātas vektors projekcijās krustiņa koordinātu sistēmā un \vec{v} ir Durbja priekšgala ātrums (4.2. att.) krustiņa koordinātu sistēmā, priekšgalam būtu jāpieliek iepriekš apskatītais momenta vektors (4.3. vienādojums). Bet pielikt var tikai vektoru $Q_y y - Q_z z$. Tas nozīmē, ka ir nepieciešams atrast tādas $Q_y y$ un $Q_z z$, lai radītais moments pēc iespējas mazāk atšķirtos no \vec{T} . Būtībā tas ir atrisināms, vienkārši pieliekot T_y projekciju šarnīrā uz y ass un T_z projekciju šarnīrā uz z ass.

4.1.4. Vidus korpusa stabilizācija

Saistībā ar Durbja unikālo dizainu tā vidusdaļa var brīvi griezties ap transportlīdzekļa garenvirziena asi. Ņemot vērā mūsdienu datorsistēmu spēju ātri apstrādāt datus, tas sevišķi netraucē Durbja kā autonoma transportlīdzekļa pārvietošanās procesā. Bet to ir iespējams arī novērst, pievienojot vertikālā virziena sensoru – žiroakselerometru, ko nodrošina MEMS (mikroelektromehāniskā sistēma, angļu val. *micro-electro-mechanical system*) tehnoloģija. MEMS žiroakselerometrs savienojumā ar *ArduinoUNO* mikrokontrollera plati izveido references punktu, kas sakrīt ar vidusdaļas krustiņa jeb Durbja kardāna tipa mehānisma koordinātu sistēmu. Šī sistēma elektroniski nosaka modeļa centra asu virzienu, to nobīdi no fiziskās sistēmas koordinātu asīm, kas apzīmēta ar $\Delta\phi$. Šo vērtību ir paredzēts kompensēt ar viena (vai abu) rotējošā vītņkorpasa ģenerētā rotācijas spēka palīdzību. 4.5. attēlā redzama minētā koordinātu asu nobīde $\Delta\phi$ transportlīdzekļa ģeometrijā. Šī ideja ir aizgūta no apgrieztā svārsta stabilizācijas problēmas [16], ko apraksta vienādojums:

$$f(t) = k_1 x(t) + k_2 x'(t) + k_3 \left(\theta(t) - \frac{\pi}{2} \right) + k_4 \theta'(t) \quad (4.5.)$$



4.5. att. Vertikālās koordinātu ass leņķiskās nobīdes principiāls attēlojums.

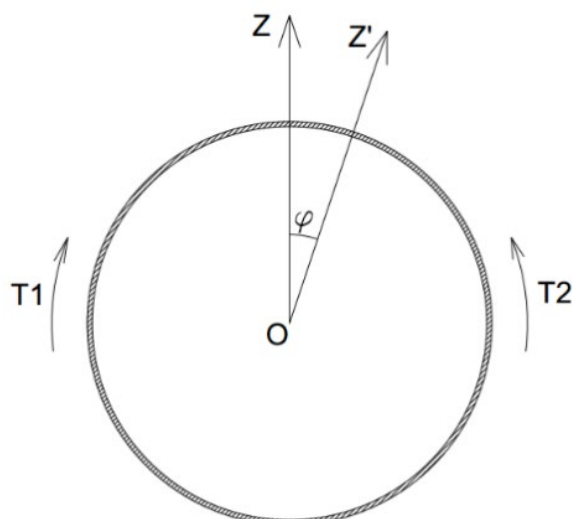
Izveidotais modelis var griezties ap y un z asīm, nezaudējot vidusdaļas vertikālo orientāciju, tāpēc kompensācija ir nepieciešama tikai rotācijai ap modeļa garenvirziena x asi jeb nobīdei no z ass, kā redzams 4.6. attēlā. Pateicoties šim nosacījumam, problēma kļūst par viendimensionāla, kā šajā vienādojumā:

$$f(t) = k_1\varphi(t) + k_2\varphi'(t) \quad (4.6.)$$

Rezultāts, kas jāpanāk, ir pārvietošanās laikā saglabāt noteiktu nemainīgu transportlīdzekļa ātrumu. Stabilizācija būtu panākama, manipulējot ar vītņoto korpusu rotācijas ātrumu projekcijām $\Delta\omega_i$ uz kardāna tipa mehānisma koordinātu sistēmas garenvirziena ass, kam vienādojums šāds:

$$\begin{cases} \Delta\omega_1 = k_1\varphi + k_2\frac{d\varphi}{dt} \\ \Delta\omega_2 = -k_1\varphi - k_2\frac{d\varphi}{dt} \end{cases} \quad (4.7.)$$

Un vītņoto korpusu rotācijas ātruma manipulācija būtu panākama, aprīkojot šo korpusu iegriezošos dzinējus ar proporcionāli integrālā diferenciālā (*PID*, angļu val. *proportional–integral–derivative*) regulatora vadību, kas pielāgotu šo dzinēju rotācijas ātrumu starpību starp priekšējo un aizmugurējo korpusu.



4.6. att. Vidusdaļas stabilizācijas shematisks attēlojums, z-y šķērsgriezums.

4.1.5. Vadības algoritma varianti

Ņemot vērā to, ka Durbis tālākās attīstības versijās iespējams kā AZT, tam būtu jāapsver divi vadības algoritma varianti.

Viens variants būtu realizēt konkrētu dzinēja griezes momentu, iegūstot vadību pēc ātruma, kas ļautu pielāgoties peldēšanai vidēs ar mainīgu vai konstantu straumes ātrumu. Ar šo vadības algoritmu zemūdens modelis spētu pielāgoties un pretoties vides dinamiskajai ietekmei, sasniedzot savu mērķi.

Otrs vadības algoritms būtu motora pagriezienu leņķa realizācija, kas būtu panākams ar soļa dzinēja piedāvātajām funkcijām. Laika momentā modeļa lokālajās koordinātās tiktu realizēts dzinēja pagrieziens, kas pielāgotu transportlīdzekļa kustības kursu uz globālajās koordinātās lokalizētu mērķi.

4.2. Vadības algoritms pēc virziena

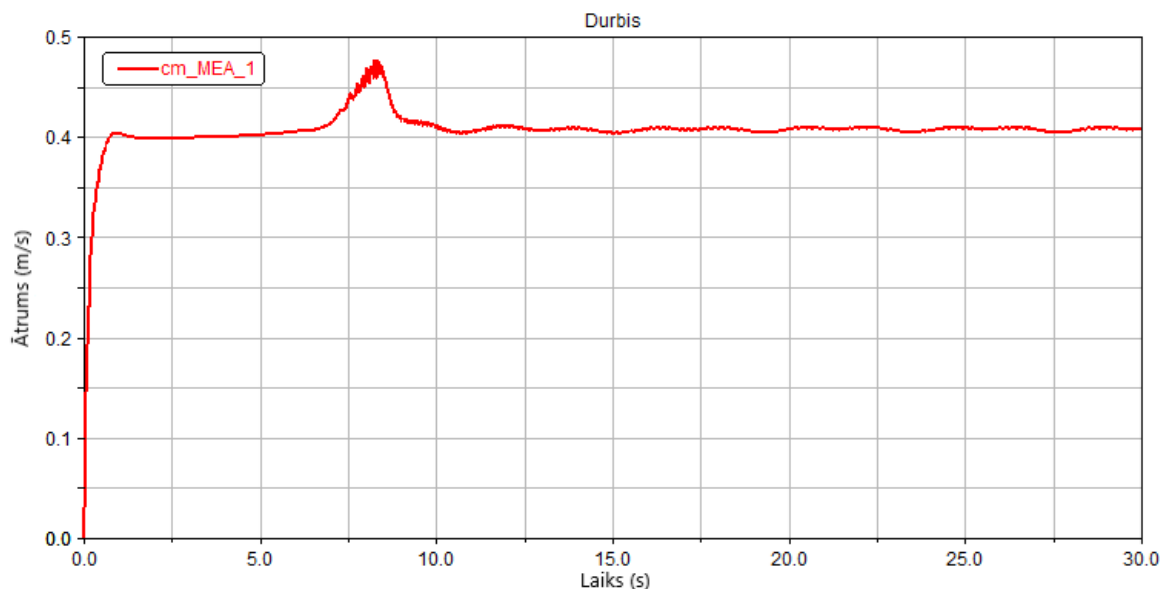
Tika uzmodelēts un apskatīts algoritms, kur matemātiskais modelis 30 sekundes peld telpā, savu virzienu regulējot ar vadības dzinēja palīdzību. 4.7. attēlā redzams transportlīdzekļa un mērķa novietojums xy globālajā koordinātu plaknē. Mērķa kustība definēta tā, kā norādīts 3.3. nodaļas 3.6. attēla teksta atsaucē.



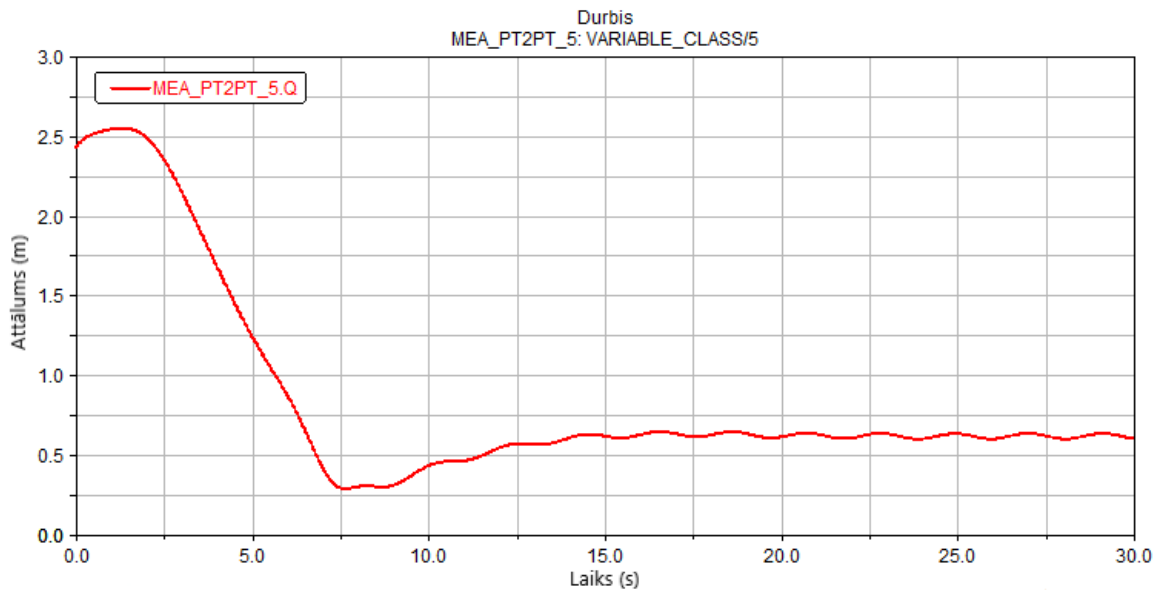
4.7. att. Objektu novietojums xy koordinātu plaknē.

Iesākot kustību, transportlīdzeklis mierīgi ieņem virzienu uz mērķi un pāris sekunžu laikā tam pietuvojas, ieturot distanci, bet precīzi tam sekojot. 4.8. attēlā redzams transportlīdzekļa ātruma grafiks.

Ātruma grafikā redzams, ka kustības sākumā transportlīdzeklis ātri un bez triecieniem ieņem noteiktu ātrumu. Pēc 7 sekundēm tā ātrums palielinās, paralēli pietuvojoties mērķim, kas redzams 4.9. attēla grafikā. To varētu izraisīt mērķa pēkšņā kustības izmaiņa, pēc kuras transportlīdzeklis ir paguvis pietuvojoties mērķim. Pēc šīs nestabilitātes transportlīdzeklis ieņem būtiski nemainīgu ātrumu, kā rezultātā tas mazliet attālinās no mērķa, bet turpmāk ietur stabilu distanci.



4.8. att. Transportlīdzekļa ātruma grafiks (vadība pēc virziena).

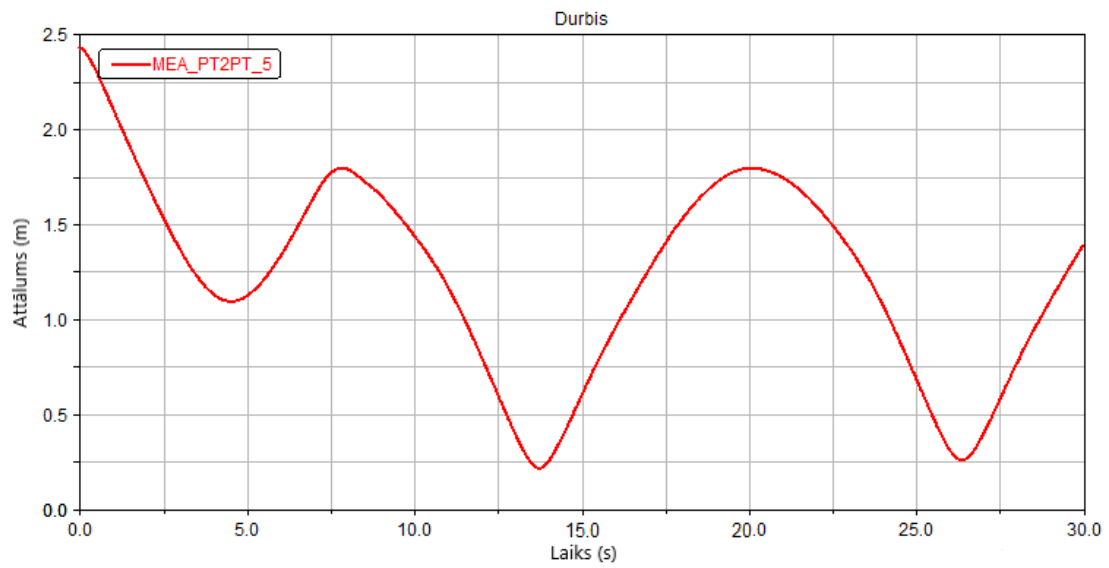


4.9. att. Transportlīdzekļa priekšdaļas attālums līdz mērķim.

4.3. Vadības algoritms pēc ātruma

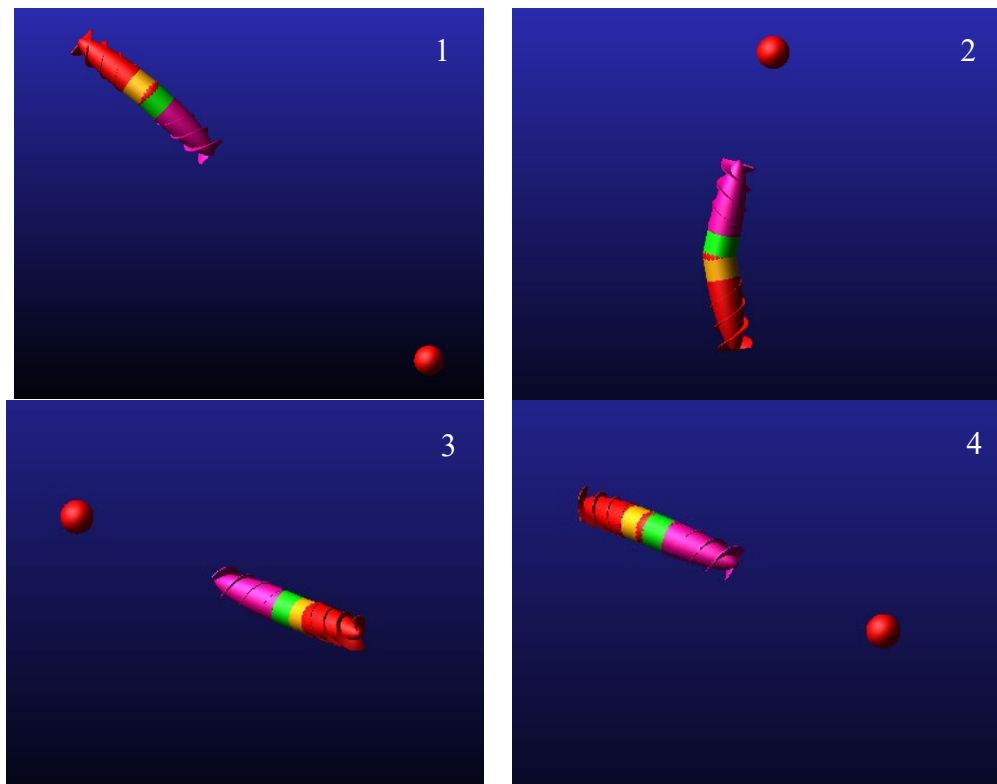
Vadības algoritmu salīdzināšanai tika izveidots arī algoritms pēc ātruma vadības. Objektu sākuma stāvoklis ir tāds pats, kā redzams 4.7. attēlā, to sākuma distance nav mainīta. Pirmais novērojums lika pievērst uzmanību tam, ka transportlīdzekļa ātruma grafiks šim algoritmam sakrīt ar vadības pēc virziena transportlīdzekļa ātrumu, kas redzams 4.8. attēla grafikā. Tas identiski iesāk kustību, veic nestabilu ātruma izmaiņu, kas vēlāk nostabilizējas.

Savukārt transportlīdzekļa priekšdaļas attāluma līdz mērķim grafiks gan būtiski atšķiras. 4.10. attēlā redzams, ka transportlīdzeklis ar šo vadību nespēj ieturēt stabilu distanci, tā ir laikā svārstīga. Tas ir skaidrojams ar to, ka mērķa objekts svārstās telpā, savukārt ātruma vektors tik strauji savu virzienu nemaina, un tā rezultātā modeļa priekšgals neieņem mērķim tuvāko stāvokli. Neskatoties uz to, transportlīdzekļa vidējais attālums līdz mērķim nemainās. Tas ietur noteiktu attāluma izmaiņas amplitūdu un neatpaliek no mērķa.



4.10. att. Transportlīdzekļa ātruma grafiks (vadība pēc ātruma).

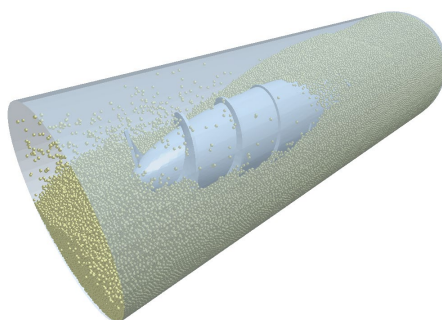
4.11. attēlā redzams, kā transportlīdzeklis laika momentos seko mērķim.



4.11. att. Transportlīdzekļa sekošana mērķim laika momentos: 1) 5 s; 2) 10 s; 3) 20 s; 4) 26,5 s.

5. MATEMĀTISKĀ MODEĻA IZVEIDE UN ANALĪZE PROGRAMMĀ *EDEM*

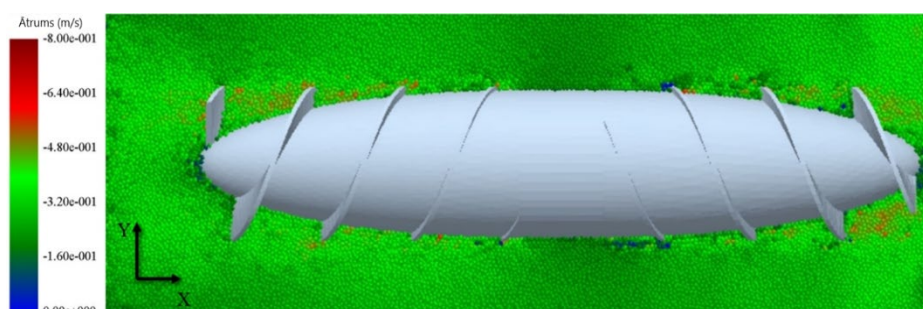
Lai novērtētu Durbja spējas beramā vidē, eksperimentos tika izmantota diskreto elementu modelēšanas programmatūra *EDEM*. Simulāciju mēģinājumos modelis tika veidots pēc analogiska paņēmiena, kāds tika izmantots šķidrās vides modeļos. Beramā viela ieplūst horizontālā virzienā ar piešķirtu plūsmas ātrumu $v = 0,6$ m/s. Darbojas arī gravitācija plūsmai perpendikulārā virzienā. Simulācijas modeļa vienkāršībai ir izvēlētas vienkāršas sfēriskas daļiņas aptuveni kviešu grauda izmērā. Daļiņām piešķirtas īpašības: Puasona koeficients $\nu = 0,25$, cietvielas blīvums $\rho = 600$ kg/m³ un bīdes modulis $G = 4e + 06$ Pa. Atjaunošanās koeficienta un statiskās berzes koeficienta vērtības tiek saglabātas saskaņā ar *EDEM* materiālu modeļu datubāzes noklusētajām vērtībām, respektīvi, 0,55 un 0,2. Fizikas sadaļā abos – gan daļiņa-daļiņa, gan daļiņa-ģeometrija – mijiedarbības gadījumos tika izmantots Herca–Mindlina (bez slīdes) kontaktu modelis. Durbja ģeometrija, ievietota aprēķina domēnā ar ieskaujošajām daļiņām, redzama 5.1. attēlā.



5.1. att. Durbis simulācijas fāzē, kurā aprēķinu domēns piepildās ar diskretajām daļiņām.

Beramā vidē plūsmas stāvokļa maiņa nav paredzēta, tāpēc gan priekšējam, gan aizmugurējam korpusam ir iestatīts vienāds leņķiskais ātrums.

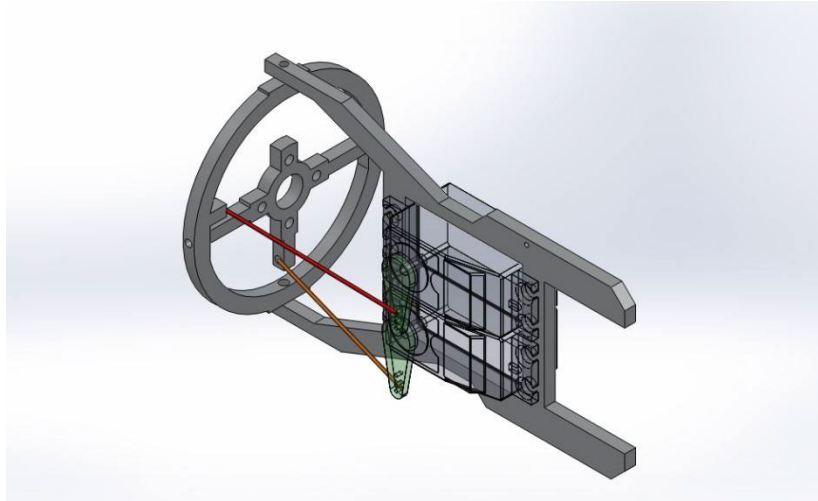
Daļiņu plūsmai tika iestatīts mainīgs plūsmas ātrums, ar kuru tika noteikts mirklis, kura laikā vītņu starptelpā plūstošo daļiņu ātrums bija aptuveni vienāds ar apkārtējās vides daļiņu ātrumu. Šis laika moments redzams 5.2. attēlā. Plūsma notiek x ass pozitīvajā virzienā. Šajā momentā konstatētais plūsmas ātrums ir 0,4 m/s pie iestatītajiem vītņu korpusu rotācijas ātrumiem $\omega = 35$ rad/s.



5.2. att. Durbis diskreto daļiņu plūsmā, *EDEM* simulācija.

6. MODEĻA PROTOTIPS

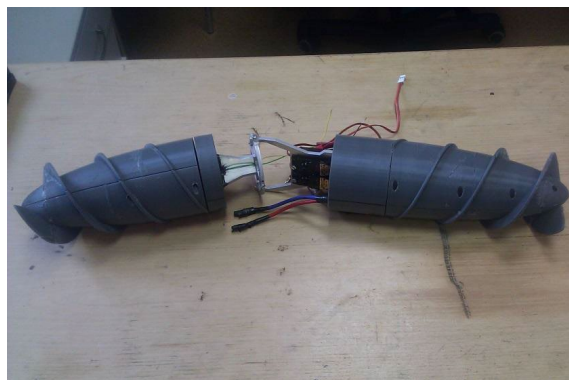
Tika izveidots Durbja prototips ar vadības funkcijām. Durbja vadība tika realizēta ar elastīgu jeb lokāmu viduskorpusu, ko iespējams saliekt ar šarnīru sistēmu, ko izmanto motorizētu lidojošu gaisa pūķu vadīšanai. Šī sistēma būtībā ir balstīta kardāna tipa mehānisma stiprinājuma idejā, kur viena daļa ļauj kustību virzienā uz augšu un uz leju, otra – uz sāniem, abas daļas ir iestiprinātas viena otrā (6.1. att.).



6.1. att. Kardāna tipa vadības mehānisms.

Durbja prototipam ārējais vadības gredzens, kas piestiprināts pie fiksēta rāmja, atbild par virziena mainīšanu uz sāniem, vidusdaļa, kas iestiprināta ārējā gredzenā, atbild par vertikālā virziena maiņu. Šīs abas komponentes tiek kontrolētas ar servomotoriem, kam tiek dots analogs signāls no tālvadības pults. Tika piemeklēti speciāli zemā profila servomotori, kas ietaupa vietu vidus korpusā, kas nepieciešama 11,1 V akumulatoram, piedziņas motoru ātruma kontrolierim un 4 kanālu uztvērējam. Mehānisms tika izgatavots no 4 mm bieza *EN AW-5754* ar lāzera griešanas tehnoloģiju.

Pārējās modeļa korpusa komponentes tika izgatavotas ar 3D printera tehnoloģijas palīdzību. Durbis samontētā stāvoklī redzams 6.2. attēlā.



6.2. att. Durbis bez silikona apvalka samontētā stāvoklī.

Pēc veiktajiem izmēģinājumiem testa ūdenstilpnē, kā redzams 6.3. attēlā, tika novērots, ka Durbis zemūdens stāvoklī sekundes laikā spēj nopeldēt apmēram sava korpusa kopējo garumu, kas ir aptuveni 60 cm/s, pie vītņkorpusu rotācijas ātruma ~ 10 apgr./s. Eksperimentos, kas tika veikti ezerā, Durbis bija spējīgs pat izlekt virs ūdens virsmas (6.4. att.).



6.3. att. Ūdenī ielaists Durbis ar papildu masu.



6.4. att. Durbis, kas lēcienā iznirst virs ūdens virsmas.

SECINĀJUMI

1. Piedāvātais transportlīdzekļa piedziņas princips, kas sākotnēji tika izstrādāts lietošanai zem ūdens, ir līdzīgs dabā mikropasaulē sastopamajam baktērijas *Salmonella typhimurium* kustības principam, taču atšķiras ar to, ka arī rotējošā priekšdaļa rada papildu dzinējspēku. Tehniski piedāvātais princips ir oriģināls un līdz šim zemūdens, kā arī cita veida transportlīdzekļos nav realizēts.
2. Telpiska mehānisma un fluīda dinamikas modelēšanai izstrādāts metamodelēšanas princips – ar *CFD* programmatūru veikti modelēšanas eksperimenti, un to apstrādes rezultātā radīti ūdens pretestības modeļi. Ūdens pretestības modeļi realizēti daudzķermeņu dinamikas modelēšanas programmā *MSC Adams*. Validācija ar reālu prototipu pilnībā apstiprināja matemātiskā modeļa adekvātumu. Ar prototipu bija iespējams veikt manevrus reālā ūdenstilpnē, ne brīdi nezaudējot tā veiktspēju un spējot saglabāt konstantu ātrumu – aptuveni 0,6 m/s, kas sakrīt ar *Flow3D* modelēšanas rezultātiem. Ņemot vērā to, ka naturālajam prototipam ar vizuālo metodi tika noteikts aptuvenš ātrums, ir pieņemta iespējama 5–10 % atšķirība no modelēšanas rezultātiem. Verifikācijā starp *Flow3D* un *MSC Adams* ātruma rezultāti uzrādīja 33 % atšķirību – mērķim sekošanas ātrums 0,4 m/s.
3. Izstrādātā kinemātiskā shēma ar lokāmu vidusdaļu un locīšanas dzinēju vadību apstiprināja darbaspējas, simulējot transportlīdzekļa dinamiku plūsmas modelēšanas programmatūrā *Flow3D*, diskrēto elementu modelēšanas programmatūrā *EDEM* un daudzķermeņu dinamikas analīzes programmatūrā *MSC Adams*.
4. Tika izveidots transportlīdzekļa fiziskais prototips, lietojot moderno tehnoloģiju: *CAD* programmatūru *SolidWorks*, *Flow3D*, *EDEM* un *MSC Adams*. Matemātiskās modelēšanas un fiziskā prototipa izmēģinājumi pilnībā apstiprina piedāvātā piedziņas principa darbību un efektivitāti. Pie relatīvi nelielas motora jaudas un griezes momenta ūdens vidē ir sasniedzams visai liels kustības ātrums – 0,6 m/s. Savukārt beramā vidē – 0,4 m/s.
5. Šis piedziņas princips ir lietojams autonomos bezapkalpes transportlīdzekļos, kas pārvietojas šķidrums vai beramās vidēs. Izveidojot korpusu un vītnes no elastīga materiāla, šāds transportlīdzeklis varētu pārvietoties pa caurulēm. Mikroizmēru mehānismu tādējādi varētu izmantot arī, piemēram, medicīnā, pārvietojoties pa asinsvadiem un veicot medicīniskas manipulācijas. Ja elastīgo vidusdaļas korpusu būtu iespējams izgatavot no mākslīgo muskuļu šūnām, varētu iztikt bez esošās vidus korpusa mehānikas, galvenokārt bez diviem servomotoriem, atvēlot vietu citām svarīgām komponentēm. Savukārt, izveidojot korpusu un vītnes no materiāliem, kam ir augsta diluma noturība un maza berzes pretestība pret iežiem, tas varētu urbties zem zemes, veicot nepieciešamās manipulācijas, kā arī veikt glābšanas darbus iežu vai cita veida nogrūvos.
6. Turpmākais darba virziens varētu būt šo transportlīdzekļu vadības jomas izpēte, izveidojot, piemēram, pjezoelektriski realizētu vītnes priekšdaļas profila mainīšanu, lai veiktu kustības virziena maiņas manevrus. Padziļināti pētījumi ir veicami priekšējās un

aizmugures daļas dzenošo vītņu formas optimizācijā, lai sasniegtu maksimālo ātrumu, manevrējamību un energoefektivitāti. Aprīkojot ar piemērotu enerģijas avotu, šādam transportlīdzekļa dizainam ir potenciāls ārpus zemes operāciju veikšanā uz citām planētām.

7. Radīti divi *PD* tipa algoritmi sekošanai kustīgam mērķim. Matemātiskā modelēšana apstiprināja algoritmu efektivitāti.
8. Vēl ir veicami pētījumi vadības jomā, lai noteiktu piemērotāko vadības principu izstrādātajai piedziņas sistēmai dažādos apstākļos. Jāīsteno aprakstītais princips vidusdaļas rotācijas stabilizācijai. Taču šis aspekts autonomiem bezpilota aparātiem nav kritisks, jo modernās datorsistēmas spēj pietiekami ātri pārrēķināt koordinātu sistēmas datus, lai sistēma neapjuku un spētu ieturēt paredzēto kursu. Situācijās, kad ierīcei nav iespējams tiešā veidā sazināties ar misijas centru, izmantojot GPS vai kādu citu tuvumā izvietotu antenu, neskaitot mākslīgā intelekta tehnoloģiju, tiek lietotas autonomās navigācijas sistēmas, kas zemūdens transportlīdzekļiem pamatā sastāv no akustiskās pozicionēšanas un inerciālās navigācijas sistēmām. Citās vidēs ir lietojamas tādas metodes kā Montekarlo lokalizācija, paralēlā lokalizēšana un kartēšana.

LITERATŪRA

1. Wadoo S., Kachroo P., *Autonomous underwater vehicles: modeling, control, design, and simulation*. – Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
2. KEMPCO INC. *Amphibious land reclamation vehicle*. Peter Kovacs, Mihaly Kovacs, Endro Kovacs (inventors). US Cl. US5509370A. Publ. 1996-04-23.
3. Shardcore, “e coli (2006)”, <http://www.shardcore.org/shardpress2019/2006/01/19/e-coli-2006/>, piekļūts 14.09.2021.
4. Kon K., “Treponema pallidum, spirochetes bacteria that cause syphilis, 3D illustration”, <https://www.shutterstock.com/image-illustration/treponema-pallidum-spirochetes-bacteria-that-cause-783390835>, piekļūts 14.09.2021.
5. Weymouth G. D., Triantafyllou M. S. Ultra-fast escape of a deformable jet-propelled body. *Journal of Fluid Mechanics*, 721:367–385, 2013.
6. Vincent J. F. V. et al. Biomimetics: its practice and theory. *Journal of the Royal Society Interface*. 22 August 2006, 3 (9), pp. 471–482. doi:10.1098/rsif.2006.0127. PMC 1664643. PMID 16849244.
7. Toda Y., Rahman Md. M., Hashimoto S., Mino J. Development of the Osaka University Squid-Like Underwater Robot, No: *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'16*, Itālija, Cortona, 17.–19. oktobris, 2016. Cortona: 2016, 283.–296. lpp.
8. Huffard, C. L. Locomotion by *abdupus aculeatus* (cephalopoda: Octopodidae): walking the line between primary and secondary defenses. *J. Expl. Biol.*, 209:3697–3707, 2006.
9. Weymouth G. D., Biologically Inspired Force Enhancement for Maritime Propulsion and Maneuvering, No: *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles HIPER'16*, Itālija, Cortona, 17.–19. oktobris, 2016. Cortona: 2016, 401.–414. lpp.
10. Triantafyllou M. S., Weymouth G. D., Miao J. Biomimetic survival hydrodynamics and flow sensing. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48 (1):null, 2016. doi: 10.1146/annurev-fluid-122414-034329.
11. “FILOSE research project”, <http://www.filose.eu/>, piekļūts 06.03.2021.
12. International Submarine Engineering Ltd., “EXPLORER AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE(AUV)”, https://auvac.org/files/uploads/platform_pdf/ise%20explorer%202009_2.pdf, piekļūts 10.03.2021.
13. International Submarine Engineering Ltd., “Explorer AUV”, <https://ise.bc.ca/product/explorer/>, piekļūts 10.03.2021.
14. Carroll, J., Marcum, D. Developing a Surrogate-Based Time-Averaged Momentum Source Model from 3D CFD Simulations of Small Scale Propellers. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The World Congress on Engineering*, London, United Kingdom, July 2013, pp. 1622–1627, (2013).

15. Sordalen O. J., Dalsmo M., Egeland O. An exponentially convergent law for a nonholonomic underwater vehicle, in *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, May 2–7, 1993, 790–795.
16. Gäfvert M. Modelling the Furuta Pendulum. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH), 1998. (Technical Reports TFRT-7574).



Mārcis Eimanis dzimis 1990. gadā Saldū. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu mašīnzinātnē (2012) un inženierzinātņu maģistra grādu mehānikā un mašīnzinātnē (2014). No 2013. līdz 2017. gadam strādājis metālapstrādes uzņēmumā SIA "EHT Fabrik", ieņemot inženiera amatu. No 2017. līdz 2021. gadam bijis SIA "Skonto Plan LTD" ražošanas inženieris, līdzās tam no 2019. līdz 2021. gadam – arī zinātniskais asistents RTU, piedaloties Latvijas zinātniskajā projektā.

Patlaban M. Eimanis ieņem mehānikas inženiera amatu uzņēmumā SIA "Giraffe360".