

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Edgars KOVALS

PELDOŠU OBJEKTU DINAMIKAS ANALĪZE

Promocijas darba kopsavilkums

**Nozare: Mašīnzinātne
Apakšnozare: Mašīnbūve**

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnbūves fakultāte

Mehānikas institūts

Edgars KOVALS

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve (virziens -
Mašīnbūve)” doktorants

PELDOŠU OBJEKTU DINAMIKAS ANALĪZE

Nozare: Mašīnzinātne
Apakšnozare: Mašīnbūve

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
Jānis VĪBA

Rīga 2012

UDK

Kovals E. Peldošu objektu dinamikas analīze
Promocijas darba kopsavilkums. R.:RTU,
2012.-25 lpp.

Iespiests saskaņā ar MI institūta 2012.gada 14.
februāra lēmumu, protokols Nr.15

ISBN

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU (inženiertehnikas, mehānikas un
mašīnbūves)
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu (inženiertehnikas, mehānikas un mašīnbūves) doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. Rīgas Tehniskās universitātes Mehānikas un mašīnbūves fakultātē, Ezermalas ielā 6, auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Grigorijs Panovko
Krievijas Zinātņu akadēmija

Profesors, Dr. sc. ing. Jānis Auziņš
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. sc. ing. Ēriks Kronbergs
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu (vai cita) doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Edgars Kovals(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 1 pielikumu, 165 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 129. lappuses. Literatūras sarakstā ir 49 nosaukumi.

SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Pētījumu metodika.....	7
Zinātniskā novitāte un aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti.....	7
Praktiskais pielietojums.....	8
Darba struktūra un apjoms	8
Būtiskāko konferenču saraksts	8
Būtiskāko publikāciju saraksts	9
PROMOCIJAS DARBA SATURS.....	11
SECINĀJUMI.....	21
LITERATŪRA.....	23

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Peldošu objektu (kuģu, zemūdeņu, baržu utt.) pārvietošana dzinējspēka radīšanai tiek lietotas propulsijas iekārtas. Līdz šim pati populārākā propulsijas iekārta dēļ savas vienkāršās uzbūves, zemajām ekspluatācijas izmaksām un atbilstību mehāniskā enerģijas avota rotācijas piedziņas tipam, kopš tā tika izgudrota, ir bijusi dzenskrūve. Dotais darbs veltīts alternatīvas propulsijas iekārtas izveidei un izpētei. Tiek pētītas alternatīvas propulsijas iekārtas, kuras ir balstītas uz biomimētisku, dabā sastopamu dizainu. Piedāvātie modeļi ir biomimētiskam objektam - zivs astei - līdzīgi vēdekļi, kas darbojas pēc līdzīga principa.

Robotu tehnikā šādas propulsijas iekārtas ir maz izpētītas, galvenais šķērslis to pielietojumam ir tas, ka plāksnes veida astes elementiem ir turp-atpakaļ svārstību kustība (dzenskrūves tipa dzinekļiem rotācijas kustība notiek tikai vienā virzienā). Papildus tam jāņem vērā astes svārstību kustības mijiedarbība ar ūdeni, kas rada lokālus virpuļus katrā svārstību ciklā.

Pirmajā darba daļā apskatīti dažādi propulsijas iekārtu tipi, dots to salīdzinājums, apskatīti pētījumi saistītajā jomā. Izvirzīti darba mērķi – izstrādāt biomimētisku propulsijas iekārtu matemātiskos modeļus un tos optimizēt; izstrādāt principus un patentus robotizētām peldošām sistēmām ar mijiedarbības laukuma izmaiņu, kas ģenerētu mainīgu propulsijas spēku; izstrādāt principiāli jaunu 6 dimensiju peldoša objekta matemātisko aprēķinu modeli ar vadību un apkārtējās vides iedarbību.

Tālākajās darba iztirzājuma daļās izstrādātas propulsijas iekārtas ar cietu, neelastīgu vēdekli un dažādiem ierosmes tipiem – harmoniska ierosme un adaptīva ierosme. Izveidoti propulsijas iekārtu matemātiskie modeļi programmā MathCAD, kurā veikta matemātisko modeļu simulācija un propulsijas iekārtas parametru optimizācija. Izstrādāta parametru optimizācijas metodika robotizētu mehānisku sistēmu pētīšanai programmā MathCAD, pielietojot slīdošu parametru. Izstrādāta metode peldoša robota korpusa kustības modelēšanai sadalot objektu 2 apakšsistēmās: propulsīvā orgāna dinamiskā vilces spēka noteikšana; korpusa dinamika no propulsīvā orgāna impulsiem.

Izstrādāta propulsijas iekārta ar mainīgu aktīvās darba virsmas laukumu kā efektivitātes paaugstināšanas līdzekli. Veikta propulsijas iekārtas ar mainīgu aktīvās darba virsmas laukumu un dažādu tipu ierosmēm matemātisko modeļu izveide un to simulācija programmā MathCAD. Apskatīta peldoša objekta vadība ar minēto propulsijas iekārtu bez atsevišķiem vadības orgāniem – kustība uz priekšu, atpakaļ, pa labi, pa kreisi. Dota propulsijas ar laukuma maiņu iekārtas robota sintēzes metode.

Izstrādāts arī trīsdimensionāls peldoša objekta modelis ar sešām brīvības pakāpēm un apkārtējās vides iedarbību. Ņemti vērā tādi kustību ietekmējošie faktori kā vējš, straume, viļņi un propulsijas iekārta. Pielikumā ievietoti gaisa pretestības koeficientu mērījumu gaisa tunelī procesa un eksperimentu rezultāti.

Darbā norādītie propulsijas iekārtu modeļi, metodes un paņēmieni ir izmantojami kā teorētiskās un praktiskās bāzes pamats, lai turpinātu konkrētā objekta pētniecību.

Darba mērķis un uzdevumi

Darba mērķis ir sintezēt jauna tipa peldošu robotu propulsijas iekārtas, kas ir konkurētspējīgas jau esošajām dzenskrūves tipa piedziņas iekārtām, vai pat pārspēj tās atsevišķos gadījumos (klusā kustība, nav dzenskrūvēm raksturīgā trokšņa, astes svārstību kustība nebojā zemūdens faunu, manevrētspēja, efektivitāte utt.).

No literatūras apskata secināts, ka pieejamajos apskatītajos informācijas avotos netiek pievērsta pietiekama uzmanība alternatīvām biomimētiskām propulsijas iekārtām un to izveidei. Zivjveidīgo kustības pamatā ir laterālas korpusa kustības, kuru viļņveida izliekums pārvietojas aksiāli korpusam, veidojot pozitīvu atgrūšanās spēku pret apkārtējo vidi. Kā galvenais darba mērķis ir izvirzīts dažādu biomimētisku propulsijas iekārtu izveide un simulācija.

Par cik biomimētisko objektu pārvietošanās ātrums ir proporcionāls korpusa kustību ātrumam un apgriezti proporcionāls korpusa daļas attiecībai, kura tiek izmantota peldēšanā, šīs sakarības ir ņemtas vērā veidojot peldoša robota propulsiju matemātiskos modeļus. Samazinot peldēšanā iesaistīto propulsijas korpusa daļu, liela nozīme ir astes formai, tā tieši ietekmē pārvietošanās ātrumu.

Svarīgs aspekts robotu dizainā un izveidē ir enerģētiskā efektivitāte, kas faktiski nosaka degvielas autonomiju jeb pārvietošanās attālumus, kā arī robota vadība. Līdz ar to pētījumu mērķis pēc modeļu izveides ir optimizēt matemātiskā modeļa propulsijas darbību piemeklējot optimālos parametrus ar fokusu uz mehānisko efektivitāti.

Nosprausto mērķu sasniegšanai risināti sekojoši uzdevumi:

- Veikts literatūras apskats, apskatītas zivju propulsijas iekārtu pamatnostādnes, zivju propulsijas iekārtu tipi, zivju peldēšanas tipi un propulsīvo iekārtu salīdzinājums;
- Veikts ievērojamāko pētījumu apskats;
- Izvirzīts darba mērķis un uzdevumi;
- Izveidoti propulsijas iekārtu analītiskie modeļi;
- Izveidots matemātiskā modeļa algoritms;
- Propulsijas iekārtu matemātisko modeļu izveide:
 - o Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi;
 - o Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi un parametru optimizāciju;
 - o Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi;
 - o Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi un parametru optimizāciju;
 - o Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi un laukuma maiņu;
 - o Peldoša objekta modelis ar 6 kustības brīvības pakāpēm, apkārtējās vides ietekmi un vadību.
- Sintezēts vibrāciju ierosmes robots ar konstantas plūsmas ierosmi;
- Izstrādāti propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu vadības paņēmieni;
- Izstrādāts peldoša objekta modelis ar apkārtējās vides ietekmi;
- Cietas propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu sintēze.

Pētījumu metodika

Darba izstrādāšanas gaitā tika pielietotas sekojošas metodes:

- Klasiskās mehānikas mehānisku sistēmu dinamiskās analīzes metodes kustības diferenciālvienādojumu izpētē;
- Hidrodinamisku mijiedarbību ar kustīgu objektu ūdenī datormodelēšanas metodes ar matemātisko aprēķinu veikšanas programmatūru MathCAD;
- Optimālās vadības atrašanas metode peldoša objekta kustības vadības optimizācijas metode pielietojot Pontrjagina principu;
- Sistēmas parametru optimizācijas metode robotizētu mehānisku sistēmu pētīšanai izmantojot slīdošu parametru;
- RTU izstrādātās optimālās sintēzes algoritma inversā metode;
- Ātru un lēnu vibrāciju dekompozīcijas metode;
- Kustīgo objektu formas pretestības spēku identifikācijas eksperimentālā metode vēja tunelī.

Zinātniskā novitāte un aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti

Zinātniskā novitāte ir tādu jauna tipa peldošu robotu propulsijas iekārtu analītisko modeļu sintēze, kas ir konkurētspējīgas jau esošajām dzenskrūves tipa piedziņas iekārtām, vai pat pārspēj tās atsevišķos gadījumos (klusā kustība, nav dzenskrūvēm raksturīgā trokšņa, astes svārstību kustība nebojā zemūdens faunu, manevrētspēja, efektivitāte utt.). Pieejamajos apskatītajos informācijas avotos netiek pievērsta pietiekama uzmanība alternatīvām biomimētiskām propulsijas iekārtām un to izveidei. Kā galvenais darba mērķis ir izvirzīts dažādu biomimētisku propulsijas iekārtu izveide un simulācija, kuru kustības pamatā ir laterālas, periodiskas korpusa (darba instrumenta) kustības, kas veido pozitīvu atgrūšanās spēku pret apkārtējo vidi.

Svarīgi aspekti robotu dizainā un izveidē ir enerģētiskā efektivitāte, kas faktiski nosaka degvielas autonomiju jeb pārvietošanās attālumus, kā arī robota vadība. Pētījumos pēc modeļu izveides ir optimizēti matemātiskā modeļa parametri ar fokusu uz mehānisko efektivitāti. Izstrādāts jauns propulsijas iekārtas ar maināmu virsmas laukumu vadības algoritms. Galvenie pētījumu rezultāti, kurus **autors aizstāv šajā darbā**:

- Izveidoti sekojoši propulsijas iekārtu matemātiskie modeļi:
 - o Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi;
 - o Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi un parametru optimizāciju;
 - o Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi;
 - o Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi un parametru optimizāciju;
 - o Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi un laukuma maiņu;
 - o Peldoša objekta modelis ar 6 kustības brīvības pakāpēm, apkārtējās vides ietekmi un vadību.
- Sintezēts vibrāciju ierosmes robots ar konstantas plūsmas ierosmi;
- Izstrādāti propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu vadības paņēmieni;
- Izstrādāts peldoša objekta modelis ar apkārtējās vides ietekmi;
- Izstrādāta propulsijas ar laukuma maiņu iekārtu robotu sintēze.

Praktiskais pielietojums

Praktiskais pielietojums teorijas jomā ir saistīts ar jaunu robotizētu sistēmu izveidi, to vadības optimizāciju un sintēzi. Tā, piemēram, izstrādāta sistēma peldošu robotu kustības piedziņai dažādos virzienos kustības plaknē, mainot mijiedarbības laukuma vadības algoritmu laikā un fāzu plaknē. Papildus tam pilnveidota teorija kustību dekompozīcijai, sadalot matemātisko modeli divās daļās – ātrā un lēnā apakšmodelī.

Darbojoties Eiropas Komisijas 7. Ietvarprogrammas projekta FILOSE (Robotic Fish Locomotion and Sensing) sastāvā RTU svārstību sistēmu nelineāro efektu Zinātniski pētnieciskajā laboratorijā (ZPL) tika izstrādāti vairāki vienspuras un divspuru vibrokustinātāji, kuros realizētas spuru darba laukuma cikliskas izmaiņas (patenti LV 14034, LV 14077, LV 14237, LV 14289 u.c.). Piedāvāto izgudrojumu izmantošana ļauj efektīvi sadalīt spurai pievadīto enerģiju, palielinot tās daļu, kas veicina peldlīdzekļa kustību uz priekšu, un samazinot enerģijas zudumus. Rezultātā paaugstināsies spuras kustinātāja darba efektivitāte, kas ļaus palielināt robota zivs maksimālo sasniedzamo kustības ātrumu, kā arī efektivitāti.

Kopā ar RTU svārstību sistēmu nelineāro efektu ZPL paveikti objektu peldēšanas eksperimenti lineārā ūdens baseinā kā rezultātā eksperimentāli pārbaudīti sistēmas optimālie parametri.

Izstrādātas praktiskas rekomendācijas kopā ar RTU svārstību sistēmu nelineāro efektu ZPL peldošu objektu konstrukciju izveidei ar pielietojumu atpūtas pasākumos, mednieku un makšķernieku peldlīdzekļu izveidei, projektēšanai, vai arī militāros nolūkos.

Darbā norādītie propulsijas iekārtu modeļi, metodes un paņēmieni ir izmantojami kā teorētiskās un praktiskās bāzes pamats, lai turpinātu konkrētā objekta pētniecību.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbā ir sekojošas nodaļas: Anotācija, Ievads, 1. Darba mērķis un uzdevumi, 2. Literatūras apskats ar 4 apakšnodaļām, 3. Modeļu analīzes matemātiskais nodrošinājums ar 4 apakšnodaļām, 4. Peldošu objektu modeļu analīze un optimizācija ar 5 apakšnodaļām, 5. Robotizētu modeļu dinamikas analīze ar 5 apakšnodaļām, 6. Peldoša objekta modelis ar apkārtējās vides ietekmi ar 3 apakšnodaļām, Secinājumi, Pielikumi, Literatūras saraksts.

Promocijas darba apjoms ir 129 lpp., darbā ir 165 attēli un ilustrācijas, 4 tabulas, Izmantotās literatūras sarakstā ir 49 avoti.

Būtiskāko konferenču saraksts

1. „Vibration 2010”, 12.-14.05.2010, Kurska 2010, Krievija;
2. Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем “DYVIS-2009”, москва – эвенигород 2009, июнь;
3. Vibration Problems ICOVP 2011, Prague, Check Republic 2011, September;
4. 2nd International Symposium RA'11 on Rare Attractors and Phenomena in Nonlinear Dynamics. Rīga, 2011.

Būtiskāko publikāciju saraksts

Npk	Publikācijas nosaukums	Autori	Publicēta
1	Vibration Devices with Variable Working Area of Head Interacting with Liquid or Air Medium	Jānis Vība, Vitālijs Beresņevičs, Māris Eiduks, Lauris Štāls, Edgars Kovals, Guntis Kuļikovskis, Semjons Cifanskis, Jean-Guy Fontaine	Vibration 2010” konferences rakstu krājumā, 12.-14.05.2010, Kurska 2010, Krievija, 35 – 45 lpp.
2	Fin Type Propulsive Devices with Varying Working Area of Vibrating Tail	Jānis Vība, Vitālijs Beresņevičs, Semjons Cifanskis, Bruno Grasmanis, Vladimirs Jakuševics, Māris Eiduks, Edgars Kovals, Maarja Kruusmaa	Journal of Vibroengineering. Volume 12, Issue 3. 278 – 286 lpp, ISSN 1392-8716. www.jve.lt
3	Robotic Fish Tail Motion Excitation by Adaptive Control	Guntis Kuļikovskis, Māris Ābele, Edgars Kovals, Igors Tipāns, Semjons Cifanskis, Maarja Kruusmaa, Jean-Guy Fontaine	Scientific Journal of Riga Technical University. 6. Series. 33. Volume. Transport and Engineering. RTU, Riga. 2010. 15 – 20 lpp.
4	Dynamics of Vibration Machine with Air Flow Excitation and Restrictions on Phase Coordinates	Jānis Vība, Vitālijs Beresņevičs, Lauris Štāls, Māris Eiduks, Edgars Kovals, Maarja Kruusmaa	Scientific Journal of Riga Technical University. 6. Series. 33. Volume. Transport and Engineering. RTU, Riga. 2010. 9 – 13 lpp.
5	Optimization of Vibrator Motion with Air Flow Excitation	Māris Eiduks, Lauris Štāls, Jānis Vība, Edgars Kovals, Atis Vilkājs	Journal of Vibroengineering. Volume 12, Issue 5. 34 – 41 lpp., ISSN 1392-8716. www.jve.lt
6	Floating Robot Motion Dynamics Analysis and Control Synthesis	Jānis Vība, Edgars Kovals, Guntis Kuļikovskis, Māris Eiduks, Jean-Guy Fontaine, William Megill	Kursk State Technical University. IX International scientific-technical. Conference. “VIBRATION – 2010. CONTROL VIBRATION. TECHNOLOGIES AND MACHINES Volume II: 226 – 233 lpp.
7	Motion of Two Degree of Freedom Vibrator with Air Flow Excitation	Lauris Štāls, Māris Eiduks, Jānis Vība, Edgars Kovals	Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем “DYVIS-2009”, москва – эвенигород 2009, июнь. 453-459 lpp

8	Vibration Devices with Variable Working Area of Head Interacting with Liquid or Air Medium	Jānis Vība, Vitālijs Beresņevičs, Māris Eiduks, Lauris Štāls, Edgars Kovals, Guntis Kuļikovskis, Semjons Cifanskis, Jean-Guy Fontaine	Kursk State Technical University. IX International scientific-technical. Conference. "VIBRATION – 2010. CONTROL VIBRATION. TECHNOLOGIES AND MACHINES. Volume II: 35 - 45 lpp.
9	Synthesis of Vibrator with Air or Water Flow Excitation	Jānis Vība, Lauris Štāls, Atis Vilkājs, Edgars Kovals	Solid State Phenomena Vols. 147-149. Switzerland: Trans Tech Publications, 462 – 467 lpp
10	Nonlinear Optimal Synthesis of the Vibrator with Flow Excitation	Jānis Vība, Lauris Štāls, Edgars Kovals, Atis Vilkājs	JVE Journal of Vibroengineering – Vilnius: ISSN 1392-8716, December 2008, 493 – 496 lpp
11			Rare attractors and rare phenomena in nonlinear dynamics. 2008., 8-12 september. Rīga, RTU, 2008. 131-137 lpp.
12	Motion dynamics analysis of a floating robot	E. Kovals, J. Viba, Guntis Kulikovskis, Maarja Kruusmaa, Paolo Fiorini, Jean – Guy Fontaine	Vibration Problems ICOVP 2011 Supplement. ISBN 9788073727598 510-515 lpp.
13	Fluid flow vibration excitation by the control of interaction surface	Maris Eiduks, Janis Viba, Lauris Shtals, Edgars Kovals	10th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development" Proceedings, volume 10. Jelgava, 2011, 464-470 lpp.
14	Nonlinear Dynamics of Robot Fish Flexible Tail Motion	J. Viba, E. Kovals, I. Tipans, G. Kulikovskis, J.-G. Fontaine, M. Kruusmaa, W. Megill	2nd International Symposium RA'11 on Rare Attractors and Phenomena in Nonlinear Dynamics. Rīga, 2011, 177-187.lpp
15	Method for control of operating condition of hydrodynamic fin-type vibration propulsive device	J. Viba, S. Cifanskis, V. Jakushevich, O. Kononova, J.-G. Fontaine, E. Kovals	Patent LV 14055, Republic of Latvia, Int.Cl. B63 H1/00.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Viss ap mums visapkārt mūsu ikdienas dzīvē, dabā, tehnikā, kā arī mēs paši atrodamies vidē, kur fiziskos priekšmetus un ķermeņus nepārtraukti apskalo kāda mehāniska vide. Vai tas ir gaiss vai ūdens, iedarbība ir nepārtraukta un neizbēgama. Mijiedarbība ar apkārtējo apskalojošo vidi dažkārt var šķist traucējoša un nelietderīga, tomēr, gan daba, gan cilvēki ir iemācījušies apkārtējo vidi izmantot sev arī lietderīgi, piemēram, lidojot un peldot.

Zinātniskā progresa rezultātā ņemot vērā komerciālos aspektus propulsijas iekārtām ir pieņemti dažādi visiem labi pazīstami risinājumi kā, piemēram, propelleri lidmašīnām un dzenskrūves kuģiem. Tas saistīts ar dažādo industrijā pielietoto dzinekļu konstrukcijas īpatnībām, taču pamatā ar faktu, ka mehāniskā piedziņa ir rotējoša tipa. Tiek izmantotas tiešās iekšdedzes dzinēju piedziņas un pastarpinātas elektrisko dzinēju piedziņas. Parastām kuģu propulsijas sistēmām (tipiska dzenskrūve) efektivitāte ir līdz 70%, kas nav slikts rezultāts, tomēr šajā lauciņā daba joprojām ir priekšā cilvēces sasniegumiem. Dažu zivju hidrodinamiskā efektivitāte turpretī stingri pārsniedz 80%, kas ir labāks rezultāts nekā mums labi zināmo cilvēka veidoto propulsijas iekārtu efektivitātes.

Dabas radību propulsiju iekārtām salīdzinot ar cilvēka veidotām ir pozitīvie aspekti, un ir arī negatīvie. Ja neskaita atšķirības efektivitātē, tad būtisks faktors ir troksnis. Cilvēka veidoto propulsijas iekārtu izstarotie trokšņu līmeņi daudzkārt pārsniedz zivju peldēšanas trokšņu līmeņus. Pie tam, mūsdienu tehnoloģijas ir tik tālu attīstītas, ka tās ir spējīgas atpazīt cilvēka veidoto propulsijas iekārtu darbību daudzu kilometru attālumā, precīzi nosakot to tipu, kustības virzienu un varbūtējo bīstamību, savlaicīgi sniedzot informāciju par draudošām briesmām. Sākot praksē pielietot jaunus propulsiju tipus, kas līdzinātos dabā sastopamajiem, būtu stipri apgrūtināta ar tiem aprīkoto peldošo objektu atpazīstamība, kas arī prasītu pavisam jaunas paaudzes monitoringa iekārtu izveidi.

No iepriekš minētā var secināt, ka dabā sastopamo propulsijas iekārtu īpatnības ir līdz šim nepietiekami apgūtas, jo tehniskais progress ir pamatā bijis fokusēts uz cita tipa propulsijas iekārtām, neskatoties uz dabā sastopamo propulsijas iekārtu pozitīvajiem aspektiem. Līdz ar to līdzīgu propulsijas iekārtu kā dabā sastopamo izveide būtu nozīmīgs solis peldošu objektu propulsijas iekārtu izvēlē un attīstībā nākotnē.

Zinātniskais progress un mūsdienu datorsistēmu ātrums, jauda un izmērs ļauj radīt vadības sistēmas, kas pilda vienkāršu neurofizioloģisku smadzeņu funkcijas. Apgrieztajai inženierijai (*reverse engineering*), jeb rezultāta meklēšana caur procesu uz sākumu, ir princips, ka iemesls pastāv. Tātad fakts, ka dabā pastāv būtnes ar izcilām peldēšanas spējām, pierāda tādu sistēmu iespējamību. Šobrīd biomimētisko zemūdens robotikas attīstību vada

nepieciešamība pēc efektīvākiem, elastīgākiem, manevrētspējīgākiem, stabilākiem un adaptēties spējīgiem transporta līdzekļiem, arī spējīgiem strādāt sarežģītos apstākļos. Lielākais attīstības dzinēklis ir tas, ka mūsdienu zemūdens transporta līdzekļi ir paredzēti darbam mierīgos, atvērto ūdeņos. Šie transporta līdzekļi manevrēšanai izmanto dzenskrūves, un tiem ir ļoti ierobežotas manevrēšanas iespējas. Biomimētiskie zemūdens transporta līdzekļi ir galvenokārt nepieciešami vidēs, kur laba manevrētspēja, spēja radīt vilci vairākos virzienos un ātra reālā laika vadības reakcija uz pēkšņiem hidrodinamiskiem notikumiem ir obligāta. Pielietojums šādiem zemūdens robotiem, kas izmanto dabas kustības principus, saskatāms daudzās civilās un militārās nozarēs. Plašāks izklāsts norādīts tabulā 1.

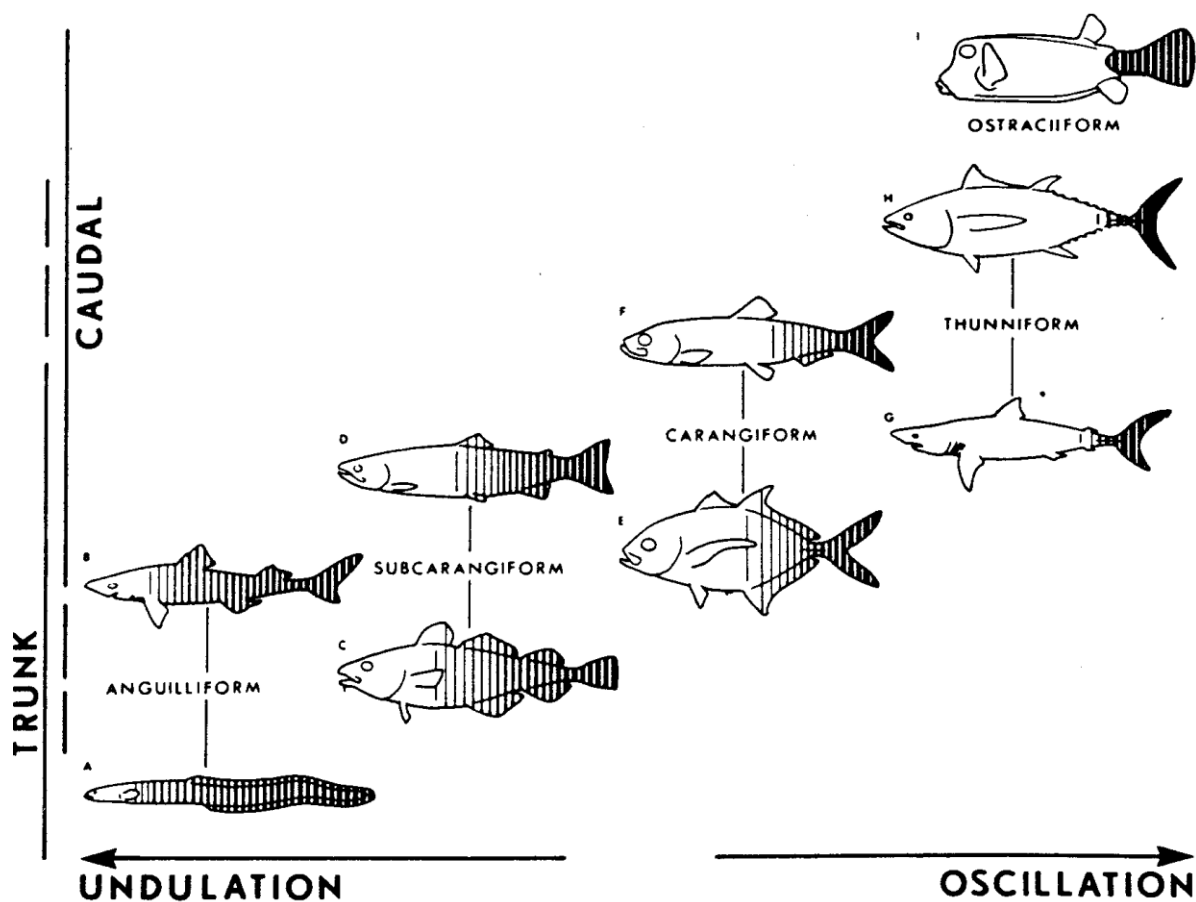
PIELIETOJUMS	Civils	Militārs
Ūdens kvalitātes noteikšana un piesārņojuma avota meklēšana	+	+
Zemūdens cauruļvadu bojājumu meklēšana	+	
Zivju populāciju meklēšana un zvejas kuģu informēšana	+	
Kuģu zemūdens daļu pārbaude bez ūdenslīdzēju klātbūtnes, korpusu apauguma vērtējums	+	+
Straumju ātruma mērīšana dažādos dziļumos	+	
Kuģu vraku un nesprāgušo lādiņu meklēšana	+	+
Zemūdens minerālo resursu meklēšana	+	
Zemūdeņu aizsargtīklu apiešana ostās u.c. inteligētie uzdevumi.		+
Zemūdens faunas izsekošana un pētniecība	+	
Ģeotermālo un seismisko zemūdens procesu monitorings	+	
Militāro lādiņu nesējplatforma		+

Tabula 1. Biomimētisku zemūdens robotu pielietojums industrijā

Zivju kustības pamatā ir sistemātiska muskulatūras darbība. Sinusoidāla korpusa *ondulēšana*, kas nozīmē secīgu korpusa savilkšanu „S” formā, ir peldošo mugurkaulnieku kustības pamatprincips. Zivij kustoties, tā pa ķermeni sūta viļņveida svārstības virzienā no priekšgala (galvas) uz pakaļgalu (astes spuru). Pārvietojošie ķermeņa izliekumi rada spiedienu

uz ūdeni aiz tiem. Spēka laterālās komponentes līdzsvarojas, kā rezultātā tiek iegūts pozitīvs vilces spēks. Lai apstātos, pietiek apturēt ķermeni saliektā stāvoklī. Ja ķermeņa svārstības sūta uz otru pusi (virzienā no astes uz galvu), iespējams panākt negatīvu kustības virzienu.

Peldēšanas procesā var būt iesaistīta dažādas ķermeņa proporcijas. Peldēšanā pielietoto muskuļu daudzums uzskatāmi parādīts attēlā 1. Zivju saimē, kas peldot galvenokārt izmanto ķermeņa un astes spuras kustības, izšķirami 4 ondulējoši hidrodinamiskās peldēšanas tipi pēc korpusa laterālo svārstību amplitūdas.



Att. 1. zivju propulsijas iekārtu tipi

Sub-carangiform – kustības ģenerēšanai tiek izmantots mazāk muskuļu, ondulējošo kustību veidošanā iesaistīts 1/3 – 2/3 no zivs muskuļu masas. Izplatīts saldūdens zivīm kā laši un foreles. Šī propulsijas tipa īpašnieki var pārvietoties ātrāk, bet ar mazāku manevrēšanas spēju. Galvas pagrieziņa leņķis ir stipri mazāks, tomēr neviens ķermeņa punkts nepārvietojas konstanti pa vai paralēli peldēšanas virzienam. Vērojama spēcīga, liela, taču elastīga astes spura, kuru var atvērt vai aizvērt tādā veidā mainot spuras virsmas laukumu 10% ietvaros katrā astes vāzienā. Interesanti, ka astes spura nav galvenais propulsijas spēka avots. Ķirurģiska astes spuras amputācija tikai nedaudz samazina peldēšanas kvalitāti. Pretēji, tiek

uzskatīts, ka lielā spura nepieciešama asam paātrinājumam, ātram pagriezienam un manevrēšanai lielā ātrumā;

Carangiform - kustības ģenerēšanai tiek izmantots mazāk par 1/3 no zivs muskuļu masas. Tipiski laterāli saspīestas formas zivīm. Laterālā kustība galvenokārt koncentrēta korpusa galā pie astes. Astes spura zivīm ar šāda tipa propulsiju ir stinga, bieži ar dziļu iegriezumu un pagarinātām daivām. Šāds spuras dizains samazina ūdens daudzumu, kas jāpārvieto laterāli, kas savukārt samazina radītās turbulences un viskozo pretestību nezaudējot vilces spēku;

Oscilējoša tipa peldēšana, kur astes spura tiek kustināta kā svārstis, bet korpus paliek relatīvi nekustīgs, novērojama zivīm, kas ķermeņa īpatnību dēļ nevar tajā radīt ondulējošas svārstības. Tām parasti nav izteiktas plūdlīniju formas un tās nav spējīgas ātri pārvietoties.

Bionisko analogiju meklējumi sākās deviņpadsmitā gadsimta sešdesmitajos gados, un drīz tie kļuva regulāri, sistemātiski un apjomīgi. Pēdējos gados, pateicoties skaitļošanas mašīnu un vadības sistēmu straujai attīstībai, zemūdens robotikas jomā ir vairāki nozīmīgi atklājumi. Šādiem robotu modeļiem ir divu sekciju aste un attālināta mikroprocesora vadības sistēma.

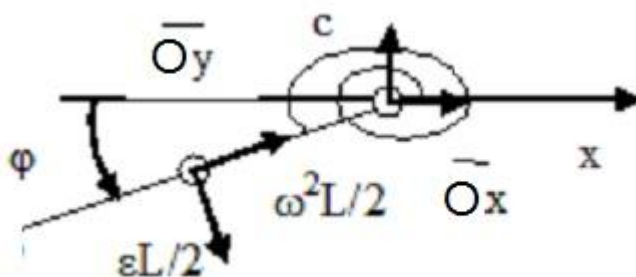
Jāpiemin autora personīgā dalība starptautiskajā pētniecības projektā FILOSE (Robotic FIsh LOcomotion and SEnsing), kas ir FP7-ICT-2007-3 STREP pētniecības projekts 7th Framework Programmas ietvaros. Šī projekta pamatmērķis ir izstrādāt zivs robota modeli ar spēju sajūst apkārtējās vides plūsmas nianses tādā veidā koriģējot izvēlēto peldēšanas veidu.

Vienkārša peldoša robota modeļa ar propulsiju izveidei var aprobežoties ar divām konstruktīvām daļām – robota pamatkorpusu un tā propulsīvā daļa jeb aste, kura ar šarnīru piestiprināta pie pamatkorpusa. Šajā gadījumā izmantojam asti, kura ir absolūti taisnstūra formas, cieta, neelastīga. Aste var svārstīties ap korpusu noteiktā diapazonā ar leņķi φ . Radītais vilces spēks pārvieto korpusu pa x asi. Darbība notiek zem ūdens, tātad homogēnā vidē, neņemam vērā ne straumes, ne viļņu, ne vēja ietekmes.



Att. 2. Vienkāršots robota modelis

Lai pareizi sastādītu visu spēku vienādojumu saskaņā ar otro Ņūtona likumu, nepieciešams sīkāk papētīt kādi spēki darbojas uz šāda tipa objektu. Kā jau tika minēts, zivs kustībai nepieciešamas laterālas korpusa kustības, kuru viļņveida izliekums pārvietotos aksiāli korpusam, veidojot pozitīvu atgrūšanās spēku pret apkārtējo vidi, turpretī radīto laterālo spēku summa izlīdzinās bez rezultējoša vilces spēka. Šie spēki uzskatāmi parādīti attēlā 2. Normāls spēkus sadalot pa asīm, iegūstam sānspēkus un vilces spēkus. Vilces spēki summējas radot kopējo vilci, bet sānspēki viens otru izlīdzina. Par cik sānspēku virzieni ir pretēji, bet neatrodas uz vienas ass, tas rada momentu pret zivs korpusu. Šis moments maina virzienu katru kustības periodu. Novērojot peldošas zivs kustības, rodas iespaids skatoties no augšas, ka tā uz katru kustības periodu nedaudz pagriežas. Minētais moments pilnībā izskaidro šīs kustības. Ja korpusam ir pietiekami liels un smags, astes kustības radīto laterālo spēku pret korpusu ietekme ir nebūtiska, kā rezultātā matemātiskā modeļa izveidē pietiek ar vienu brīvības pakāpi – astes pagriezienu pret korpusu šarnīrā leņķis φ (att. 2., 3.).



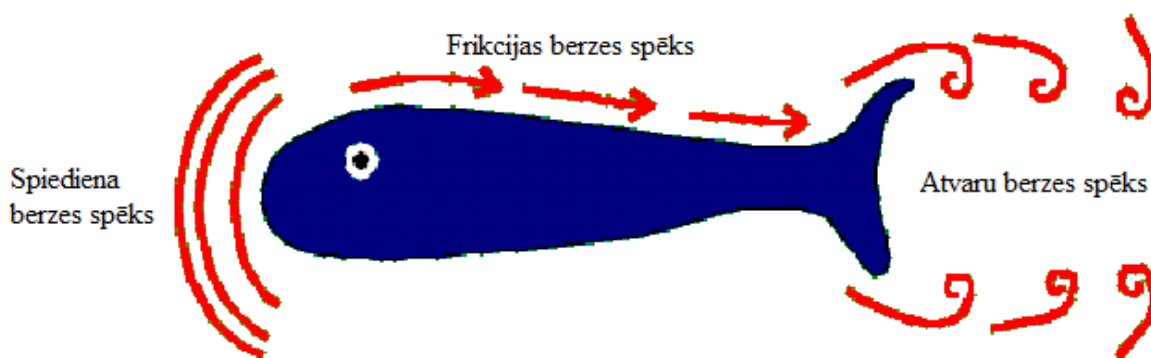
Att. 3. Astes shēma

Astes kustības nodrošināšanai nepieciešama vadība ar divu adapteru atgriezenisko saiti – pārvietojuma mērīšanai un ātruma mērīšanai. Industriālajās vadības sistēmās plaši pielieto proporcionālai integrāli diferenciālos (PID) regulatorus [16]. PID regulators mēģina labot kļūdu starp mērāmu mainīgo parametru un sistēmas uzstādījumu, kalkulejot mērāmā mainīgā parametra dinamiku un nobīdi no sistēmas uzstādījuma laikā, un attiecīgi dodot vadības komandu sistēmas aktuatoram, kura darbība ietekmē mērāmo mainīgo parametru, lai samazinātu kļūdu. PID vadībā tiek izmantotas 3 konstantes – proporcionālā, integrālā un diferenciālā. Optimāli ieregulējot šīs konstantes iespējams iegūt optimizētu sistēmas regulāciju – ar fokusu uz sistēmas reakciju vai stabilitāti. Sistēma ar pareizi neiregulētu PID regulatora darbību negarantē optimālu darbību. Dotajā gadījumā izmantojam harmonisku ierosmi kā funkciju no laika. Harmonisko ierosmi visvienkāršāk realizēt ar kādu no cikliskajām trigonometriskajām funkcijām. Izmantojam *sinus* funkciju, kura piešķir pozitīvu

vai negatīvu vērtību atkarībā no laika vērtības. Lai novērtētu astes darbību, nepieciešams zināt reakciju punktā Ox . Ja stabilas darbības reakcijas vidējā vērtība ir pozitīva ($Ox > 0$), tad aste vilks objektu atpakaļ. Pretēji, ja stabilas darbības reakcijas vidējā vērtība ir negatīva ($Ox < 0$), tad aste stums objektu uz priekšu kā tas paredzēts.

Kad zivs atrodas kustībā, tai jāpārvar apkārtējās vides radītā pretestība. Šo pretestību var sadalīt vairākās daļās (att. 4.):

- spiediena berzes spēks – saistāms ar pārvietoto jeb izspiesto ūdens masu;
- Frikcijas berzes spēks – saistāms ar kustīgā objekta virsmas īpatnībām;
- Atvaru berzes spēks – peldēšanas rezultātā radītie ūdens atvari arī atstāj ietekmi un zivs peldēšanu.



Att. 4. Apkārtējās vides iedarbības spēki uz korpusu

Dažādu pārveidojumu rezultātā matemātiski ir iegūta reakcija punktā Ox :

$$Ox = m \cdot \left\{ \begin{array}{l} \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{J_A} \cdot \\ \cdot \left[M(t) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} + (-k_1 \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi} \cdot \frac{L^4}{4}) \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi) \end{array} \right\} + k_1 \cdot B \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^3}{3}$$

Vienādojumu pārvēršot matemātiskajā simulācijā programmā MathCad, iegūst sekojošu izklāstu:

$$\begin{array}{lll} L := 0.1 & m := 1 & J_0 := m \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 \\ M_0 := 20 & k := 4 \cdot \frac{\pi}{2} & K_T := 1000 \quad B := 0.01 \quad b := 5 \quad c := 20 \\ n := 0..7000 & s := 0.000 & t_n := n \cdot s \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[K_T \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{pmatrix}$$

kur:

L – astes garums [m];

m – astes masa [kg];

J_0 – astes inerces moments [kgm²];

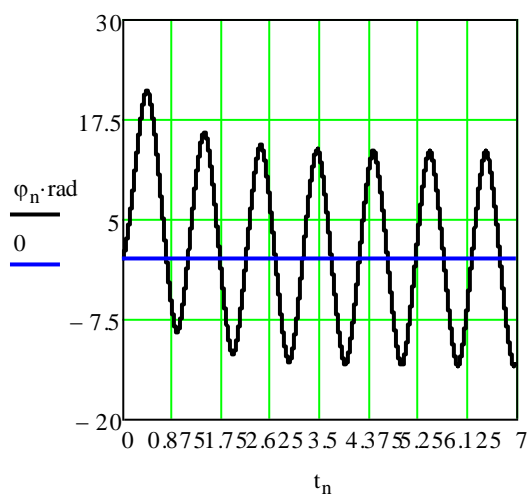
M_0, k, KT, B, b, c – konstantes;

n – simulācijas soļu skaits;

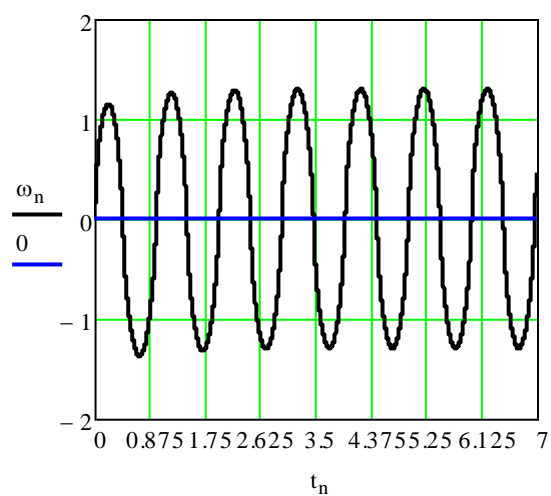
s – simulācijas soļa izmērs;

Simulācijas rezultātus grafiski ir iespējams iegūt praktiski neierobežotās kombinācijās.

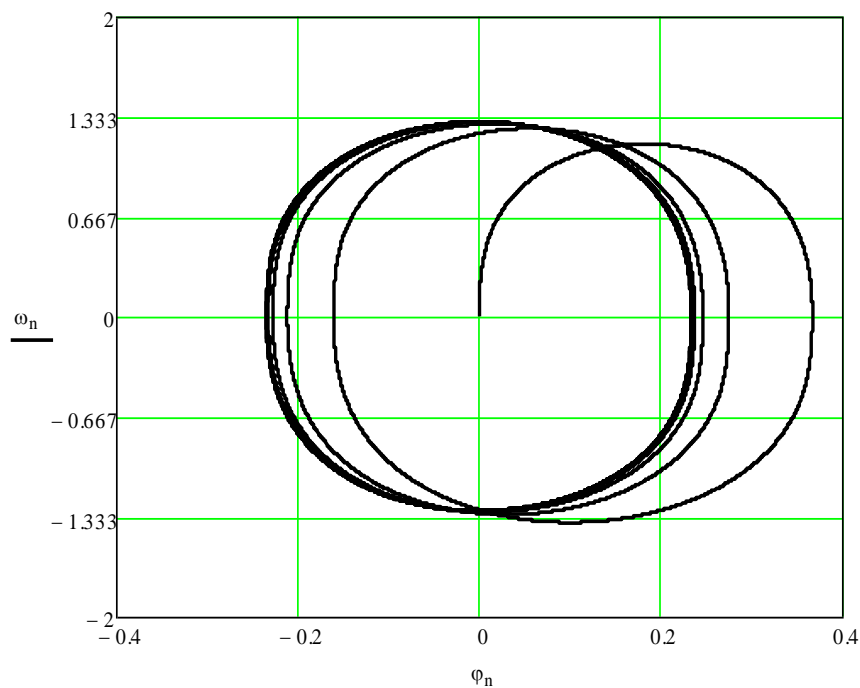
Svarīgākie no tiem:



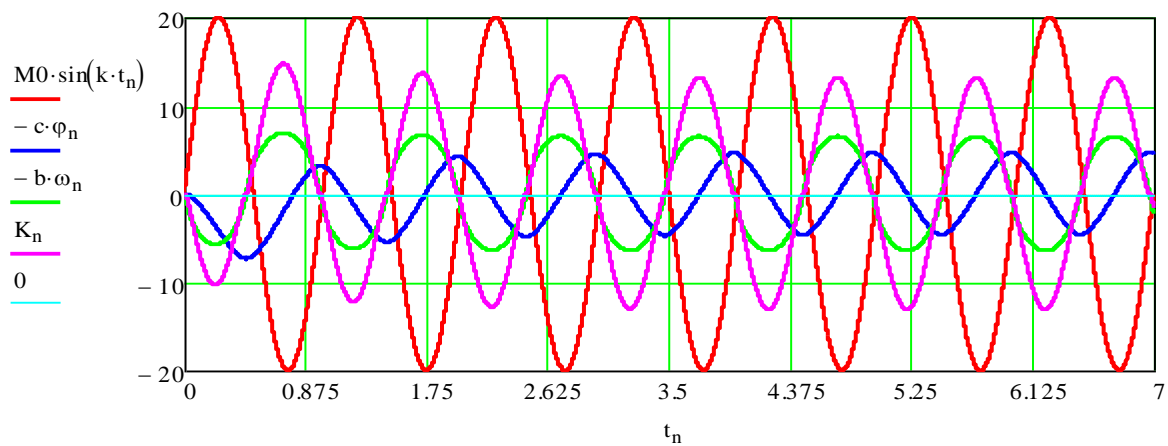
Att. 5. astes pagrieziņa leņķis laikā



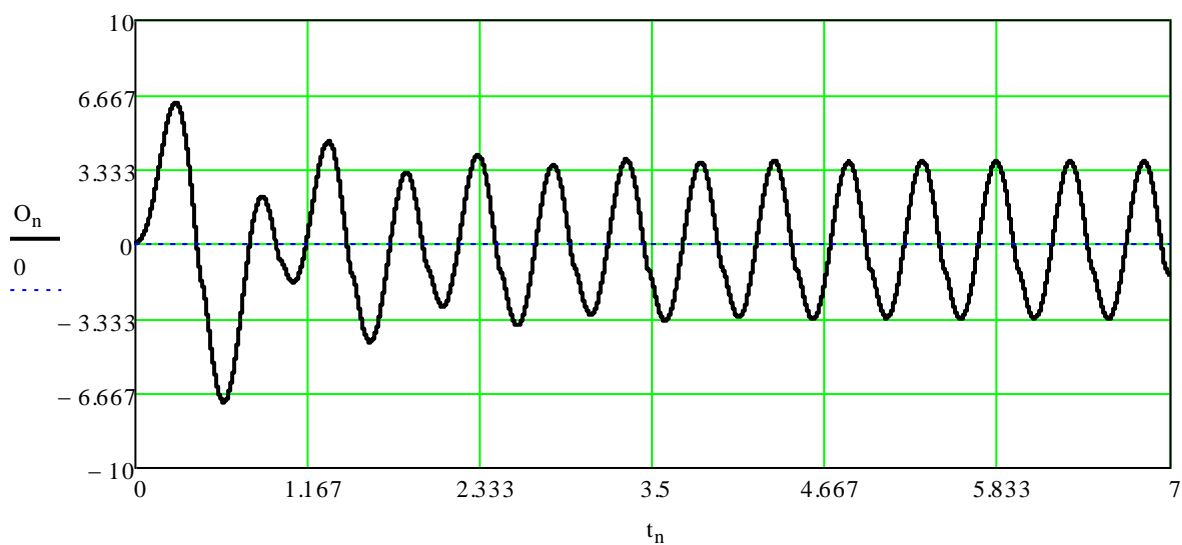
Att. 6. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums laikā



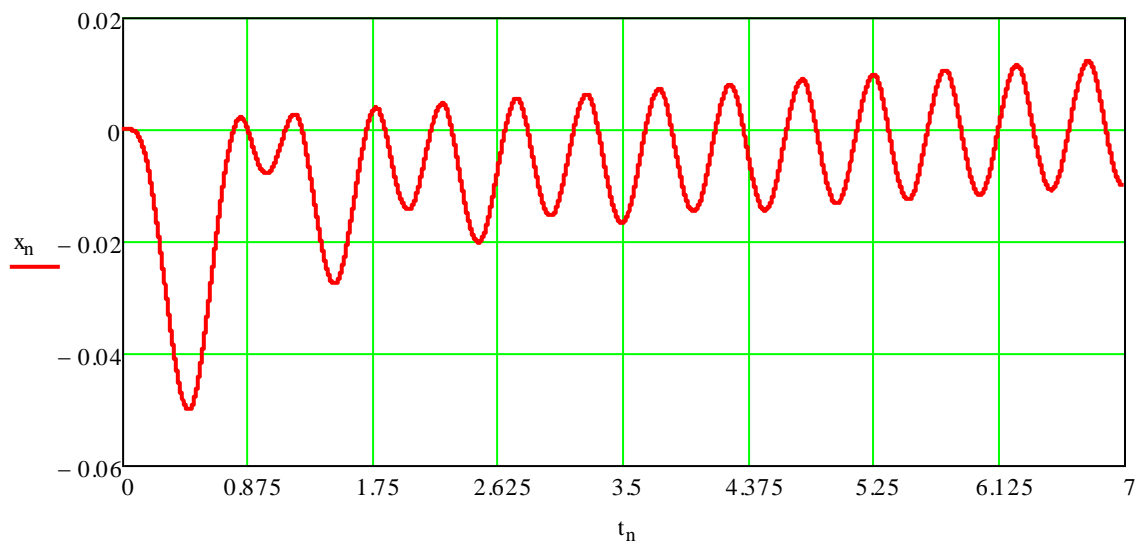
Att. 7. Astes kustība fāzu plaknē.



Att. 8. Astes kustību ietekmējošie spēki laikā



Att. 9. Astes radītā reakcija šarnīrā.



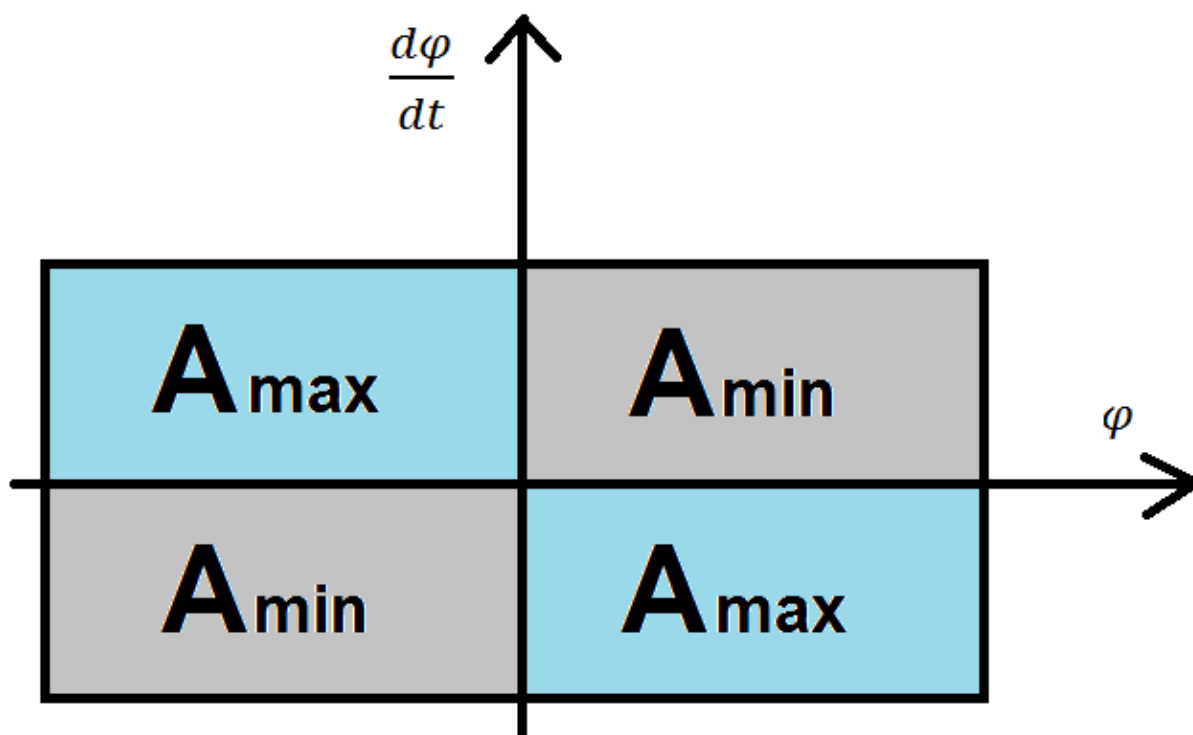
Att. 10. Korpusa pārvietojums laikā.

Optimizēšanai izmantots 3 argumentu algoritms mainīgajam parametram ar lineāru raksturu. Piedāvātā optimizācijas metode darbojas un ir pielietojama līdzīgu uzdevumu

risināšanai. Sasniegtie harmoniskas sistēmas sistēmas bez laukuma maiņas rezultāti gan neattaisno savas cerības, jo iegūtās sistēmas efektivitātes ir ļoti zemas. Modelim ar adaptīvu vadību ir virkne priekšrocību salīdzinot ar harmoniskas ierosmes sistēmu. Svarīgākā no tām ir atgriezeniskā saite no sistēmas, kā arī nemainīga spēka vērtība visā darbības periodā ir uzskatāma par priekšrocību. Dotajā gadījumā pielietotā adaptīvā vadību ir funkcija no vienādojuma fāzu koordinātēm, atgriezeniskās saites signāla pārvēršanai darbībā matemātiski izmantota *signum* funkciju $sign(\varphi, \omega)$, kura piešķir pozitīvu vai negatīvu vērtību atkarībā no argumentu skalāro reizinājumu vērtības. Adaptīva neoptimizēta modeļa efektivitāte ar līdzīgiem parametriem gandrīz divas reizes pārsniedz optimizēta harmoniskā modeļa efektivitāti. Par galveno iemeslu var minēt kustības ātrumu starpību no „0” stāvokļa līdz maiņas punktam un atpakaļ. Modelis ar adaptīvu ierosmi nodrošina lielāku astes ātrumu pie atspēriena tādējādi radot lielāku efektīvo impulsu. Optimizējot atsperes stingumu, modelis ar adaptīvu ierosmi spēja uzrādīt 30 reizes labāku efektivitāti kā neoptimizētais modelis, kas parāda milzīgo optimizācijas nozīmi mehānisko sistēmu risināšanā.

Vēl labāki rezultāti iegūti matemātiskā modeļa ar mainīgu propulsijas iekārtas virsmas laukumu. Sākotnēji pētījuma mērķis bija parādīt gaisa vai šķidrums plūsmas ierosmes praktiskā pielietojuma iespējas vibrotehnikā. Tika analizēta vibromašīnas ar konstantu gaisa vai šķidrums plūsmas ierosmi dinamika. Pamatideja bija atrast optimālo vadības likumu, pēc kura vajadzētu variēt izpildorgāna darba virsmas laukumu dotās robežās. Optimizācijas kritērijs ir laiks, kas nepieciešams, lai pārvietotu mašīnas izpildorgānu no sakuma pozīcijas līdz galējam stāvoklim. Ātrdarbības problēmas risināšanai izmantots Pontrjagina maksimuma princips. Parādīts kā pie optimālas vadības darba laukumam jāpieņem robežvērtības. Ieviesti arī ierobežojumi uz fāzu koordinātēm. Izstrādāts vibrāciju ierosmes robots ar konstantas plūsmas ierosmi.

Pēcāk par pētījuma objektu kļuva spuras tipa propulsijas iekārta ūdens vidē. Mērķis – atrast optimālo spuras laukuma maiņas vadības likumu, kas nodrošinātu maksimālo propulsijas iekārtas efektivitāti attiecībā uz radīto vilces spēku. Problēma tika atrisināta izmantojot Pontrjagina maksimuma principu. Noskaidrots, ka laukuma maiņa veicama ar galējām vērtībām kustības maiņas punktos. Dotā metode ļauj palielināt propulsijas iekārtas laukumu brīžos, kad notiek efektīvais vēziens jeb darba gājiens, un samazināt laukumu brīžos, kad notiek atvēziens, tādā veidā samazinot ūdens pretestības spēkus. Pateicoties šādai darbībai tiek mazināti enerģijas zudumi un palielināta sistēmas efektivitāte. Laukuma maiņas algoritms parādīts attēlā 11.



Att. 11. Laukuma maiņas algoritms

Dotajā gadījumā astes mainīgais laukums A tiek ieslēgts pozīcijā A_{max} no katras galējās kustības virziena maiņas, lai iegūtu efektīvu „atspērienu”. Astes „0” stāvoklī laukums tiek pārslēgts uz A_{min} , lai mazinātu apkārtējās vides pretestības spēkus, kamēr tiek gatavots jauns atspēriens.

Noskaidrots arī, ka apskatītās propulsijas iekārtas efektīvā darba laukuma A maiņa sniedz plašas iespējas arī robota vadībai, kas attiecas net tikai uz virzes kustības nodrošināšanu, bet arī stūrēšanu un reversēšanu. Veicot korekcijas laukuma maiņas algoritmā, iespējams panākt rezultējošo reakcijas spēku šarnīrā visos virzienos $x - y$ plaknē. Izklāstīta cietas propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu sintēzes metode, kura izstrādāta Eiropas Komisijas 7. Ietvarprogrammas projekta FILOSE (Robotic Fish Locomotion and Sensing), projekta numurs 231495, ietvaros.

Izstrādāts 3-dimensionāls Peldoša objekta matemātiskais modelis ar apkārtējās vides ietekmi, kuru varētu izmantot reālu apstākļu situāciju pētīšanai. Matemātiskajā modelī iekļauti sekojoši apkārtējās vides un vadības iedarbības spēki:

- Vēja iedarbība
- Straumes iedarbība
- Viļņu iedarbība
- Propulsijas iekārtu iedarbība.

SECINĀJUMI

1. Veicot literatūras apskatu, konstatēts, ka darba izstrādes laikā pieejamajos apskatītajos informācijas avotos netiek pievērsta pietiekama uzmanība alternatīvām biomimētiskām propulsijas iekārtām un to izveidei. Šādu sistēmu nepieciešamība ir acīmredzama minēto esošo propulsijas iekārtu nepilnību dēļ.
2. No augstāk minēto resursu apskata varam secināt, ka zivjveidīgo kustības pamatā ir laterālas korpusa kustības, kuru viļņveida izliekums pārvietojas aksiāli korpusam, veidojot pozitīvu atgrūšanās spēku pret apkārtējo vidi. Pārvietošanās ātrums ir proporcionāls korpusa kustību ātrumam un apgriezti proporcionāls korpusa daļas attiecībai, kura tiek izmantota peldēšanā. Šīs sakarības es ņemu vērā, veidojot peldoša robota propulsiju matemātiskos modeļus.
3. Samazinot peldēšanā iesaistīto propulsijas korpusa daļu, liela nozīme ir astes formai. Astes forma arī tieši ietekmē pārvietošanās ātrumu. Par cik astes formas izveide nav ietverta konkrētā darba mērķos, tiks izmantotas *sub-carangiform* un *carangiform* korpusu tipu attiecības.
4. Svarīgs aspekts robotu dizainā un izveidē ir enerģētiskā efektivitāte, kas faktiski nosaka degvielas autonomiju jeb pārvietošanās attālumus, kā arī robota vadība.
5. Mehānisko sistēmu modeļus ir ļoti ērti simulēt programmā MathCad (izmantotā programmatūras versija 14.0.0.163 [build 701291152]). MathCad vide ir ļoti piemērota tādu sarežģītu un resursus prasošu darbību veikšanai kā skaitliskā integrēšana, darbības ar matricām un rezultātu grafiskais attēlojums.
6. Izveidotais simulācijas aprēķinu algoritms ir pietiekami elastīgs, lai tajā varētu pētīt apskatīto tipu un līdzīgas mehāniskās sistēmas; atklātā parametra optimizācijas metode ir labs paņēmiens kā viegli atrast optimālu parametra vērtību bez papildu aprēķiniem.
7. Parametra optimizācija izrādījās nepieciešama pēc peldoša objekta modeļa ar harmonisku ierosmi simulācijas rezultātu iegūšanas, kuri, kā tika uzskatīts, nebija apmierinoši. Tomēr, lai arī optimizācijas ceļā tika uzlabota modeļa darbība, arī pēc optimizācijas darbības rezultāti nebija vērā ņemami, līdz ar to var secināt, ka peldošs objekta modelis ar harmonisku ierosmi ir spējīgs darboties tikai relatīvi zemā efektivitātes zonā.
8. Apskatītais peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi izrādījās krietni efektīvāks par modeli ar harmonisku ierosmi, tomēr joprojām netika sasniegta dabā sastopamo propulsijas iekārtu veiktspēja. Kā iemeslu var minēt faktu, ka apskatītie modeļi ar cietu, neelastīgu asti nevar nodrošināt laterālas korpusa kustības bioniskā izpratnē, kuru viļņveida izliekums pārvietotos aksiāli korpusam, veidojot pozitīvu atgrūšanās spēku pret

apkārtējo vidi, turpretī radīto laterālo spēku summa izlīdzinātos bez rezultējoša vilces spēka.

9. Piedāvātā propulsijas iekārta ar laukuma maiņu ir daudz elastīgāka sistēma ar praktiska lietojuma potenciālu. Ar to iespējams ne tikai panākt vērā ņemamu darbības efektivitāti, bet arī nodrošināt peldošā objekta manevrētspēju dažādos kustības plaknes virzienos. Kā arī, izstrādātais modelis ir spējīgs darboties ar negatīvu enerģijas plūsmu jeb darboties kā enerģijas ģenerators, ko pierāda piedāvātais vibrāciju ierosmes robots ar konstantas plūsmas ierosmi. Izstrādāta arī cietas propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu sistēma, uz kā pamata iegūts patents nr. 14055.
10. 6.3. nodaļā izstrādātais modelis ar 6 kustības brīvības pakāpēm var kalpot kā jauns aprēķinu modelis objektu dinamikas pētīšanai reālas vides apstākļos;
11. Radīta jauna skaitliskā metodika peldoša objekta vadībai, ievērojot vēja, straumes un viļņu mijiedarbību ar peldošu objektu;
12. Papildināta teorija par peldošu objektu dinamikas analīzi un kustības vadības sintēzi.
13. Sintezējot dinamiskas, mehāniskas sistēmas svarīgi ir izvēlēties piemērotākos materiālus, lai tādējādi tuvinātos matemātiski pierādītajiem vēlamajiem parametriem. Neapšaubāmi svarīgs faktors ir berzes/vilces koeficienti ar apkārtējo vidi.
14. Pielikumā ievietoti eksperimentu Armfield vēja tunelī rezultāti ar dažādu formu ķermeņiem. Šajā gadījumā uzmanība jāpievērš pārklājuma materiālam, jo eksperimenti pierādīja, ka vienādas formas ķermeņi ar dažādu pārklājumu uzrādīja dažādus gaisa pretestības jeb vilces koeficientus, pie tam mazāko pretestību uzrādīja ķermenis ar pūkainu virsmas pārklājumu salīdzinot ar ķermeni, kam bija gluda virsma.

LITERATŪRA

1. McGrail, Sean (2001). „*Boats of the World*”. Oxford, UK: Oxford University Press. p. 431. ISBN 0-19-814468-7;
2. Lacy BE, Rosemore J (October 2001). "*Helicobacter pylori: ulcers and more: the beginning of an era*" (abstract). J. Nutr. 131 (10): 2789S–2793S. PMID 11584108;
3. Thanbichler M, Wang S, Shapiro L (2005). "*The bacterial nucleoid: a highly organized and dynamic structure*". J Cell Biochem 96 (3): 506–21. doi:10.1002/jcb.20519. PMID 15988757;
4. „*Scientific Analysis of the Efficiency of Bird Flight*” <http://mb-soft.com/public3/birdeff.html> C. Johnson, Physicist, Physics Degree from Univ of Chicago;
5. "*Ship Form, Resistance and Screw Propulsion*" by GS Baker, published in 1920.
6. „*Artificial fish locomotion and sensing (FILOSE)*” Funded under 7th FWP (Seventh Framework Programme). Research area: ICT-2007.2.2 Cognitive systems, interaction, robotics (ICT-2007.2.2);
7. G. Kuļikovskis, M. Ābele, E. Kovals, I. Tipāns, S. Cifanskis, M. Kruusmaa, J.G. Fontaine. „*Robotic Fish Tail Motion Excitation by Adaptive Control*”. Scientific Journal of Riga Technical University. Transport and Engineering. Mechanics. 2010. Vol. 33. 15 – 20. lpp.;
8. C.M. Breder, “*The locomotion of fishes*”, Zoologica, vol. 4, pp. 159-297, (1926) The Journal of Experimental Biology 206, 2749-2758 (2003);
9. Breder, C.M. Jr., (1926) „*The Locomotion of Fishes*”. Zoologica, 4: 159-296;
10. Michael, Scott., (2001) "*Marine Fishes*". T.F.H. Publications, Neptune City, New Jersey;
11. Sfakiotakis, Michael, Lane, David D., Davies, J. Bruce C., (1999) „*Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion*”. Journal of Oceanic Engineering, Vol. 24: 237-252;
12. „*Model fish robot*”. PPF-06i. <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/>
13. Kleiner K. „*Robot fish synchronize into schools*”. [skatīts 10. 06. 2008.]. www.newscientist.com/article/dn14101-school-of...
14. „*Projects 2006 Airacuda BIONIC Airfish*” http://www.festo.com/cms/en_corp/9762.htm

15. „*Robotic fish powered by Gumstix PC and PIC*”. Human Centered Robotics Group at Essex University. <http://cswww.essex.ac.uk/staff/hhu/HCR-Group.html#Entertainment>
16. „*Robotic fish in action at London Aquarium*” <http://www.physorg.com/news7029.html>
17. „*PID controller*”. <http://en.wikipedia.org/wiki/PIDcontroller>. skatīts 06. 2009.
18. FILOSE mājas vietne. <http://www.filose.eu/tiki-index.php>
19. Cifanskis S., Vība J., Jakushevičs V., Kruusmaa M., Megill W., „*Investigation of a robotic fish fin mover functioning.*” XVI International Symposium of vibro shock machines „Dyvis”, Maskava, 2009. (krieviski).
20. Vība J., Gonca V., Švābs J., Kruusmaa M., Fontaine J.G., Megill W., Fiorini P. „*Stiffness of thin lamina rubber-metallic elements under compress.*” XVI International Symposium of vibro shock machines „Dyvis”, Maskava, 2009. (krieviski).
21. Vība J., Kruusmaa M., Fontaine J.-G. „*Robotic fish motion control optimization.*” XVI International Symposium of vibro shock machines „Dyvis”, Maskava, 2009. (krieviski).
22. D.E.Nikravesch „*Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*”, Prentice Hall, NJ, 1988.
23. R.E.Roberson, R.Schwertassek „*Dynamics of Multibody Systems*”, Springer, 1988.
24. L.I.Lurje „*Analytical Dynamics M*”, 1961.
25. http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_pressure
26. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pascal_\(unit\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Pascal_(unit))
27. [http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics))
28. http://en.wikipedia.org/wiki/Parasitic_drag#Skin_friction
29. <http://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>
30. http://en.wikipedia.org/wiki/Wall_shear_stress
31. <http://adg.stanford.edu/aa241/drag/skinfriction.html>
32. http://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_resonance
33. <http://en.wikipedia.org/wiki/Dissipation>
34. Patent LV 14055, Republic of Latvia, Int.Cl. B63 H1/00. “*Method for control of operating condition of hydrodynamic fin-type vibration propulsive device*” / J. Vība, S. Cifanskis, V. Jakushevich, O. Kononova, J.-G. Fontaine, E. Kovals. – Applied on 02.11.2009, application P-09-191; published 20.03.2010 // Patenti un preču zīmes, 2010, No. 3, p. 428.

35. „*Fluid flow energy accumulation from vibrations*” / J. Viba, L. Shtals, M. Eiduks, A. Klokovs // Вибрационные машины и технологии. Сборник научных трудов. – Курск: КГТУ, 2008. С. 676 – 682.
36. „*Mathematical Theory of Optimal Processes*” / L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mischenko. – New York: Wiley-Interscience, 1962. 390 p.
37. Boltyanskii V.G. „*Mathematical Methods of Optimal Control*” / Balskrishnan-Neustadt series. – New York: Holt, Rinehart and Winston, 1971. 412 p.
38. Ли Э.Б. „*Основы теории оптимального управления*” / Э.Б. Ли, Л. Маркус. – М.: Наука, 1972. 576 с.
39. „*Hamiltonian*” http://en.wikipedia.org/wiki/Hamiltonian_%28control_theory%29. – Resource is described on 17 February 2010.
40. Лавендел Э.Э. „*Синтез оптимальных вибромашин*” – Рига: Зинатне, 1970. 252 с.
41. Виба Я.А. „*Оптимизация и синтез виброударных машин.*” – Рига: Зинатне, 1988. 253 с
42. Patent LV 13928, Republic of Latvia, Int.Cl. B25 D9/00, B25 D11/00. „*Method for control of operation condition of one-mass vibromachine on elastic suspension*” / J. Viba, V. Beresnevich, M. Eiduks, L. Shtals, E. Kovals, G. Kulikovskis. – Applied on 03.03.2009, application P-09-38; published on 20.09.2009 // Patenti un preču zīmes, 2009, No. 9. P. 1209 – 1210.
43. Patent LV 13928, Republic of Latvia, Int.Cl. B25 D9/00, B25 D11/00. „*Method for control of operation condition of one-mass vibromachine on elastic suspension*” / J. Viba, V. Beresnevich, M. Eiduks, L. Shtals, E. Kovals, G. Kulikovskis. – Applied on 03.03.2009, application P-09-38; published on 20.09.2009 // Patenti un preču zīmes, 2009, No. 9. P. 1209 – 1210.
44. Халфман Р. „*Динамика.*” – М.: Наука, 1972. 568 с.
45. „*Motion control optimization of robotic fish tail*” / J. Viba, J.-G. Fontaine, M. Kruusmaa // Journal of Vibroengineering, 2009, vol.11, issue 4. P. 607 – 616
46. http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_dynamics.
47. <http://www.google.lv/search?hl=lv&q=Ship+motion&meta=&aq=f&oq=>
48. „*Engineering Mechanics.*” Dynamics. J. L. Meriam, L. G. Kraige. - Jon Wiley & Sones. 2006.
49. „*Engineering Mechanics.*” Dynamics. H. L. Langhaar, A. P. Boresi. McGRAW-Hill BOOK COMPANY. - New York, Toronto, London, 1959. – 719.p.