

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Edgars Kovals

Peldošu objektu dinamikas analīze

PROMOCIJAS DARBS

2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnbūves fakultāte
Mehānikas institūts

Edgars KOVALS

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**PELDOŠU OBJEKTU DINAMIKAS
ANALĪZE**

Promocijas darbs

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

Rīga 2012



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai» no 2007. – 2011.

ANOTĀCIJA

Peldošu objektu (kuģu, zemūdeņu, baržu utt.) pārvietoējuma dzinējspēka radīšanai tiek lietotas dažādas vilces jeb piedziņas iekārtas (tā saucamās 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 alternatīvu propulsijas iekārtu izveidei un izpētei, kā arī principiāli jauna 6 dimensiju peldoša objekta matemātiskā modeļa izveidei ar apkārtējās vides iedarbību. Tiek pētītas alternatīvas propulsijas iekārtas, kuras ir balstītas uz biomimētisku (dabā sastopamu dzīvu organismu) dizainu. Piedāvātie modeļi ir biomimētiskam objektam - zivs astei - līdzīgi vādekļi, kas darbojas pēc līdzīga principa.

Darbā apskatīti dažādi propulsijas iekārtu tipi, dots to salīdzinājums, apskatīti pētījumi saistītajā jomā, izvirzīti darba mērķi. Izstrādātas biomimētiskas propulsijas iekārtas, izmantojot *sub-carangiform* un *carangiform* korpusu tipu attiecības, un tās optimizētas. Izstrādātas propulsijas iekārtas ar cietu, neelastīgu vādekli un dažādiem ierosmes tipiem – ar harmonisku ierosmi un ar adaptīvu ierosmi. 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.

Piedāvāta 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 datorsimulācija. Apskatīta peldoša objekta vadība ar minēto propulsijas iekārtu bez atsevišķiem vadības orgāniem – kustība uz priekšu, atpakaļ, pa labi, pa kreisi. Parādīta propulsijas (ar laukuma maiņu) iekārtas robota sintēzes metode.

Izstrādāts 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 mērījumi vēja 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.

ABSTRACT

Propulsion systems are widely used to generate effective thrust for floating objects like ships, submarines and barges. A screw type propeller since it was developed has always been the most popular propulsion system due to the simplicity, low maintenance cost and rotary driving type complying to the machinery. Given work is dedicated to reveal new, alternative propulsion systems with biomimetic design as well as new on principal 6 DOF mathematical model of a floating object with the impact of the surrounding environment. Offered systems are similar to fish tail and also use the same working principle.

Dissertation holds research on propulsion system types, several propulsion systems comparison and findings in the field. Several tasks were drawn. Biomimetic propulsion systems with *sub-carangiform* and *carangiform* body ratios were developed, the models were optimized. Further, propulsion systems with a non-elastic fan were developed. Several excitation types were used – harmonic excitation and adaptive excitation. The mathematical models were simulated in program MathCAD where also the optimization takes place. A parameter optimization method with a floating parameter was developed for use with MatCAD. A method is offered for floating robot movement modeling by dividing the object in 2 subsystems: calculation of propulsive thrust from the propulsion device; calculating floating objects hull dynamics by the propulsive thrust.

A propulsion system with variable active work surface area is offered as a method of increasing efficiency. Mathematical model with various excitation systems simulation was done using MathCAD. The propulsion system with the variable active work surface area is also specifically viewed as navigational system with the ability to change the thrust direction in the horizontal motion plane. A method of floating robot synthesis with variable active work surface area is given.

Following research reveals a three dimensional 6 DOF floating object model with the impact of wind, current, waves and propulsive thrust. Appendix holds experimental results of air drag coefficient measured in a wind tunnel.

The proposed propulsion systems and methods and can be used as a theoretical and practical reference for further research development.

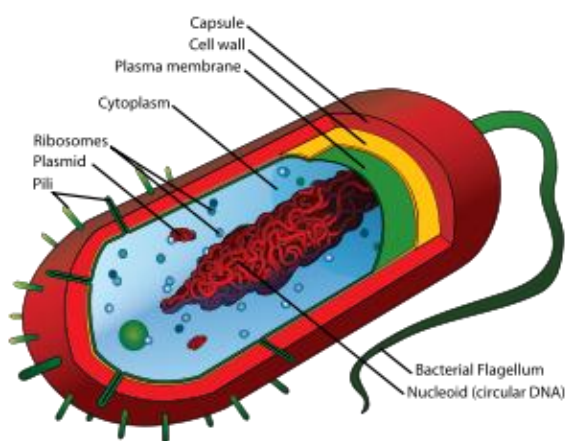
SATURS

ANOTĀCIJA.....	3
ABSTRACT	4
SATURS.....	5
IEVADS	6
1. DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	11
2. LITERATŪRAS APSKATS	12
2.1. Zivju propulsijas iekārtu pamatnostādnes.....	12
2.2. Zivju propulsijas iekārtu tipi.....	12
2.3. Zivju peldēšanas tipi un propulsīvo iekārtu salīdzinājums.....	14
2.4. Ievērojamāko pētījumu apskats	16
3. MODEĻU ANALĪZES MATEMĀTISKAIS NODROŠINĀJUMS.....	19
3.1. Matemātiskā modeļa algoritma izveide	19
3.1.1. Datorsimulācija un nomogrammas.....	19
3.1.2. Skaitliskās simulācijas modeļi.....	20
3.1.3. Skaitliskā integrēšana	22
4. PELDOŠU OBJEKTU MODEĻU ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA.....	26
4.1. Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi.....	26
4.2. Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi un parametru optimizāciju	41
4.3. Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi.....	60
4.4. Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi un parametru optimizāciju.....	71
4.5. Peldoša objekta propulsijas modelis ar harmonisku ierosmi un laukuma maiņu	81
5. ROBOTIZĒTU MODEĻU DINAMIKAS ANALĪZE.....	83
5.1. Vibrāciju ierosmes robots ar konstantas plūsmas ierosmi	83
5.2. Propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu matemātiskais modelis.....	88
5.3. Propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu vadības paņēmieni.....	96
5.4. Propulsijas ar laukuma maiņu iekārtu robotu sintēze	98
5.5. Cietas propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu sintēze	98
6. PELDOŠA OBJEKTA MODELIS AR APKĀRTĒJĀS VIDES IETEKMI.....	101
6.1. Peldoša objekta kustības diferenciālvienādojumi	101
6.2. Spēku redukcija uz masas centru	106
6.3. Peldoša objekta kustības datormodelēšana	112
7. SECINĀJUMI	120
8. PIELIKUMI.....	122
8.1. Eksperimenti vēja tunelī	122
LITERATŪRA	127

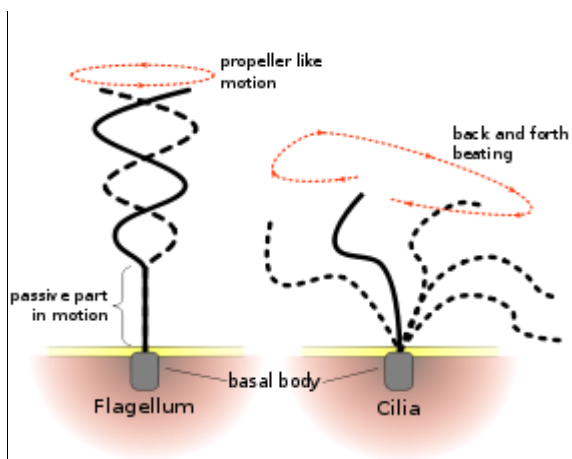
IEVADS

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.

Cilvēki izmantot apkārtējo vidi savā labā ir apguvuši relatīvi nesen, senākās liecības par laivveidīgiem peldošiem priekšmetiem ir attiecināmas uz periodu no 8200. gada līdz 7600. gadam pirms Kristus dzimšanas, bet Austrālijas aborigēnu nokļūšana uz tiem piederīgā kontinenta varētu būt datējama ap 40,000 gadu ilgā pagātnē [1]. Daba apkārtējo vidi mehāniskām vajadzībām izmanto daudz senāk. Pati pirmā dzīvības forma, kas radās uz zemes, bija viensūnas organismi *prokarioti*. Prokarioti ir tik primitīvi, ka tiem nav šūnas kodola un citu ar membrānu pārklātu organoīdu, tomēr tie ir aprīkoti ar propulsijas iekārtu - *vicu* (att. 1.), kas ļauj viensūnim pārvietoties un attiecīgi nodrošina vitālo procesu izpildi [2.], [3.]. Vicu viensūnis var kustināt vairākos veidos (att. 2.), tādējādi izvēloties sev optimālāko pārvietošanās režīmu. Izšķir propellera tipa vicas kustības un vēdināšanas tipa vicas kustības. Šo viensūņu pārvietošanās ātrums ūdenī var sasniegt pat 160 $\mu\text{m/s}$, kas ir fenomenāli, jo prokariotu izmērs ir tikai aptuveni 1 μm . Tādējādi šie viensūņi spēj nopeldēt vairāk kā 100 savus garumus vienā sekundē.



1. att. Prokariota uzbūve



2. att. Vicas darbība

Dzīvības formām attīstoties, tika adaptētas arvien jaunas un sarežģītākas propulsijas iekārtas, kas evolūcijas gaitā tika optimizētas līdz tam līmenim, kādu mēs to pazīstam šodien.

Peldošo un lidojošo dzīvo radību mehāniskā pārvietošanās efektivitāte ir apbrīnojama. Tas ļauj putniem un zivjveidīgajiem radījumiem pārvarēt milzīgus attālumus migrācijas periodu laikā, kā arī tās sezonas, kad pieejamās pārtikas rezerves ir nabadzīgas. Putnu lidojuma mehāniskā efektivitāte tuvojas 90%, turpretim cilvēka veidotu lidaparātu, piemēram, lidmašīnas „Boeing 747” vidējā enerģētiskā efektivitāte sasniedz vien 35% [4.]. Jāņem gan vērā, ka kopīgā enerģētiskā enerģijas bilance η_t (1) sastāv no vairākām sastāvdaļām, kā iekšdedzes dzinēja efektivitāte η_{dz} (metaboliskā efektivitāte dzīvām būtnēm), propulsijas efektivitāte η_p , virsmas formu efektivitāte η_v u.c. η_n .

$$\eta_t = \eta_{dz} * \eta_p * \eta_v * \dots * \eta_n \quad (1)$$

Kustības pirmais posms ir ķīmiskās enerģijas pārvēršana mehāniskajā. Ar to saistīto efektivitāti daudzkreiz arī sauc par „cikla termisko efektivitāti”. Putniem, zivīm un citām dzīvām būtnēm to sauc par metabolisko efektivitāti, un tā ir relatīvi zema – atkarībā no kustības apstākļiem tā var sasniegt 22%. To var skaidrot ar relatīvi zemajām temperatūrām metabolisko procesu norises laikā. Arī cilvēka veidotajos mehāniskās enerģijas avotos kā, piemēram, iekšdedzes dzinējos, degšanas procesu īpatnību dēļ liela daļa enerģijas tiek izmesta nelietderīgi, tomēr iekšdedzes dzinēju evolūcijas rezultātā to mehāniskā efektivitāte lēnām tuvojas jau 50% atzīmei.



Att. 3. Kuģis ar rotorburām



Att. 4. Kuģis ar izpletņa buru

Pārējie kopējo efektivitāti ietekmējošie apstākļi kā propulsijas tipi, lidojošo vai peldošo ķermeņu virsmu plūdlīniju nepilnības un citi samazina kopīgo sistēmas efektivitāti līdz līmenim, kāds tas mums ir zināms.

Peldošu objektu propulsiju sistēmas daļa 3 kategorijās – cilvēka dzītas propulsijas sistēmas, buru propulsijas sistēmas un mehāniskās propulsijas sistēmas. Cilvēka dzītas

propulsijas sistēmas pamatā ir airi, kurus plaši izmantoja (un mazizmēra kuģošanas līdzekļiem izmanto vēl šodien) pirms mehānisko enerģijas avotu izgudrošanas. Buru propulsijas sistēmas izmanto vēja enerģiju un tas ir tīrs (atjaunojamās) enerģijas avots. Tās plaši izmantoja līdz 19. gs., taču ierobežoto ekspluatācijas apstākļu dēļ mūsdienās tiek izmantotas pamatā atpūtas un sporta vajadzībām. Jāpiemin, ka eksperimentālas buru propulsiju sistēmas kā turboburas, rotorburas, spārnu buras kā arī izpletņa tipa buras tiek pielietotas uz lieliem kuģiem, lai palielinātu degvielas efektivitāti (att. 3., att. 4.).

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 propelleru piedziņas (att. 5., att. 6.). Parastām kuģu propulsijas sistēmām (tipiska dzenskrūve) efektivitāte ir līdz 70% [5.], 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.



Att. 5. dīzeļa tipa dzenskrūves piedziņa



Att. 6. Elektriskā tipa dzenskrūves piedziņa

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 vienkāršas neurofizioloģiskas 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 [6]. Šobrīd biomimētisko zemūdens robotikas attīstību vada nepieciešamība pēc efektīvākiem, elastīgākiem, manevrētspējīgākiem, stabilākiem un adaptēties spējīgiem transporta līdzekļiem, spējīgiem strādāt sarežģītos apstākļos. Lielākais attīstības dzinēklis ir tas, ka mūsdienu zemūdens transporta līdzekļi ir paredzēti darbam mierīgos, atvērtos 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 [7].

Tabula 1. Biomīmisku zemūdens robotu pielietojums industrijā

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 ūdenslīdēju 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. inteliģentie uzdevumi.		+
Zemūdens faunas izsekošana un pētniecība	+	
Ģeotermālo un seismisko zemūdens procesu monitorings	+	
Militāro lādiņu nesējplatforma		+

1. DARBA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Pētījumu mērķis ir izstrādāt biomimētisku bezpropellera propulsijas iekārtu matemātiskos modeļus, tos optimizējot (no kustības vadības un parametru viedokļa) un sintezējot principiāli jaunus enerģētiski efektīvus robotizētus, peldošus objektu modeļus.

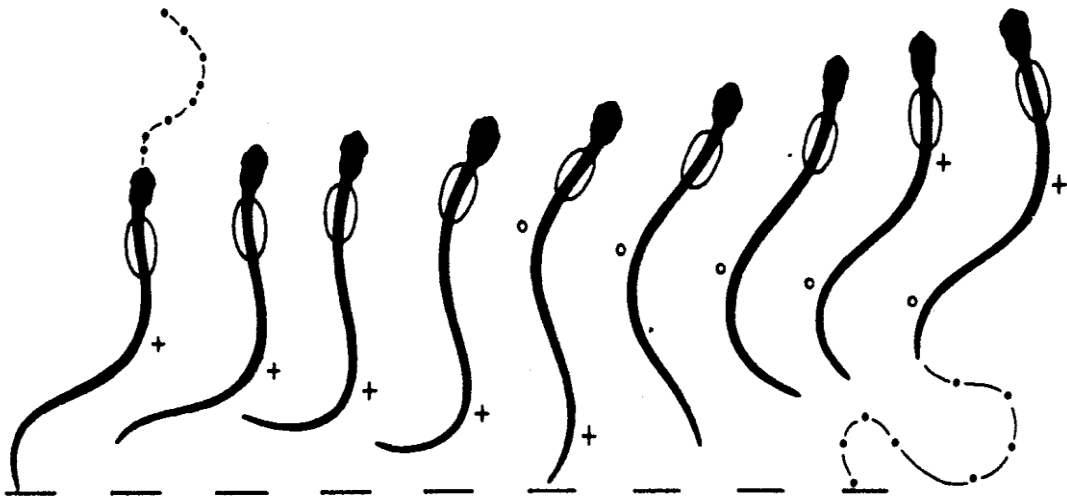
Dotajam nolūkam tiks risināti šādi **uzdevumi**:

1. Veikt literatūras apskatu par peldošu objektu propulsijas iekārtām un to vadību;
2. Izstrādāt jaunus matemātiskos modeļus un to datorsimulācijas algoritmus;
3. Pilnveidot skaitliskās integrēšanas algoritmus, kas pielietojami pie mehatronisku (elektro mehānisku) sistēmu parametru izmaiņām laikā vai fāzu plaknē;
4. Radīt jaunas peldošu objektu piedziņas shēmas (ar harmonisku, neharmonisku vai adaptīvu vadību);
5. Izstrādāt principus un patentus robotizētām peldošām sistēmām ar mijiedarbības laukuma izmaiņu, kas ģenerētu mainīgu propulsijas spēku;
6. Izstrādāt principiāli jaunu 6 dimensiju peldoša objekta matemātisko aprēķinu modeli ar vadību un apkārtējās vides iedarbību.
7. Veikt pētījumus vēja tunelī, lai iegūtu plūsmas mijiedarbības novērtējumus.

2. LITERATŪRAS APSKATS

2.1. Zivju propulsijas iekārtu pamatnostādnes

Zivju kustības pamatā ir sistemātiska muskulatūras darbība. Sinusoidāla korpusa *ondulēšana*, kas nozīmē secīgu korpusa savilkšanu „S” formā, ir peldošo mugurkaulnieku kustības pamatprincips (att. 7.).

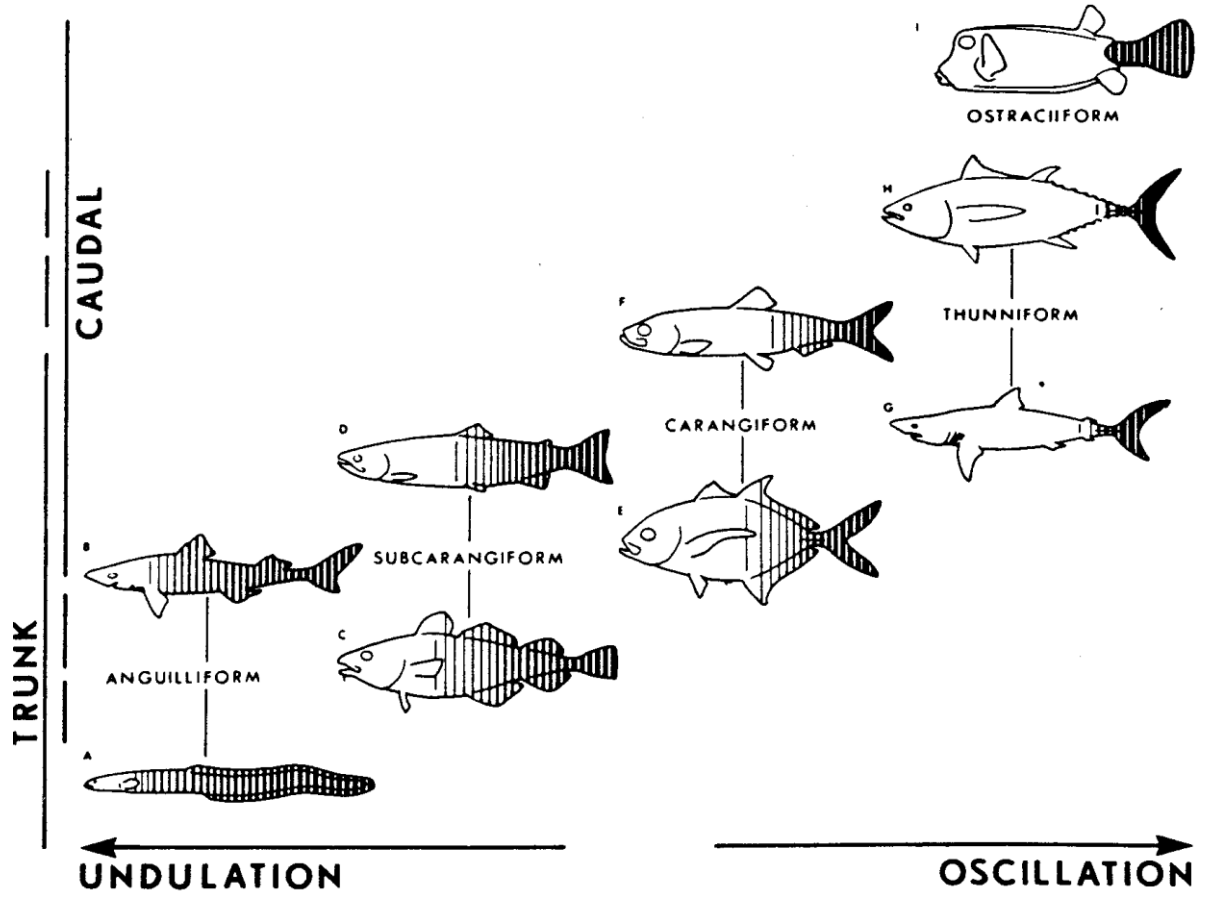


Att. 7. Ondulējoša kustība

Zivij kustoties, tā pa ķermeni sūta viļņveida svārstības virzienā no priekšgala (galvas) uz pakaļgalu (astes spura). Pārvietojošie ķermeņa izliekumi rada spiedienu uz ūdeni aiz tiem kā parādīts attēlā 7. 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.

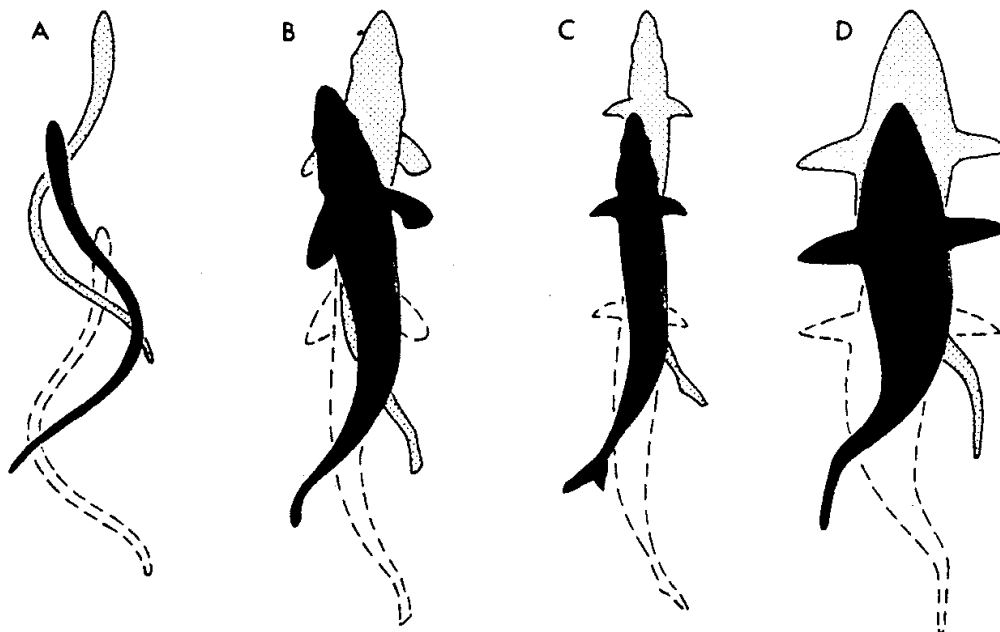
2.2. Zivju propulsijas iekārtu tipi

Peldēšanas procesā var būt iesaistīta dažādas ķermeņa proporcijas. Peldēšanā pielietoto muskuļu daudzums uzskatāmi parādīts attēlā 8. Zivju saimē, kas peldot galvenokārt izmanto ķermeņa un astes spuras kustības, izšķirami 4 ondulējoši hidrodinamiskās peldēšanas tipi [8., 9., 10., 11.] pēc korpusa laterālo svārstību amplitūdas (att. 9.):



Att. 8. zivju propulsijas iekārtu tipi

2.3. Zivju peldēšanas tipi un propulsīvo iekārtu salīdzinājums

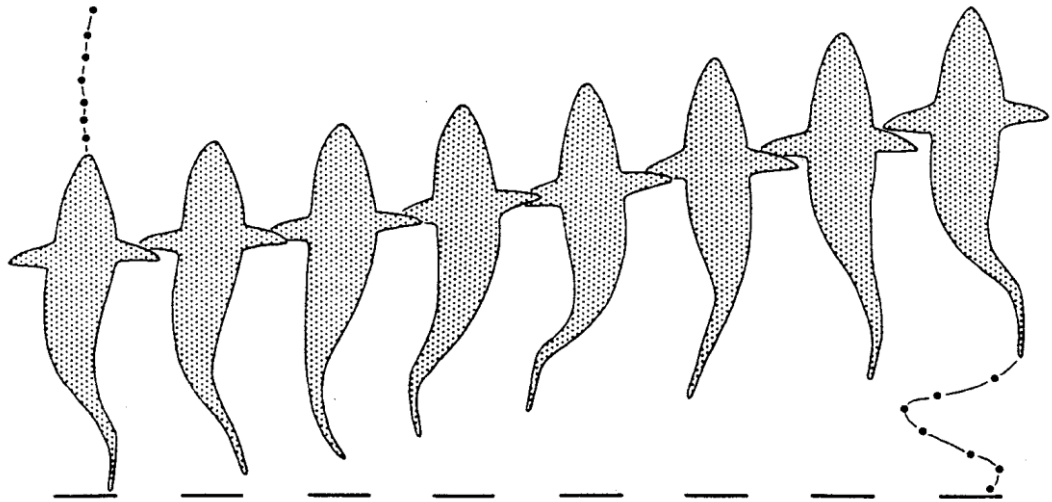


Att. 9. Zivju peldēšanas tipi

- **A. Anguilliform** - Raksturīga garām un slaidām zivīm kā zuši. Ondulējošas kustības tiek virzītas pa visu ķermeni, izņemot galvu, kas paliek relatīvi nekustīga pret ķermeni. Ķermenis ir ļoti elastīgs un peldēšanas laikā forma izliecas vismaz par pusi no sinusoīdas pusperioda;
- **B. 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 vēzienā. 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;
- **C. Carangiform** - kustības ģenerēšanai tiek izmantots mazāk par 1/3 no zivs muskuļu masas. Tipiski laterāli saspiestas 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;

- **D. Thunniform** – nosaukums iegūts no tunčveidīgajām zivīm. Atzīts par lielāko šāda tipa propulsijas sasniegumu pateicoties milzīgajam ātrumam (līdz 20m/s), ko spēj sasniegt zivis ar šāda tipa propulsijas sistēmu. Novērojams arī haizivīm un citām garu distanču peldošām zivīm. Vilce galvenokārt veidojas no astes spuras, kas ir liela, spēcīga un izteikti sašķelta. Astes spura ir pievienota pie tieva kātveidīga korpusa gala ar daudz cīpslām, kas ir savienotas ar masīvu muskuļu sistēmu. Attēls 10.

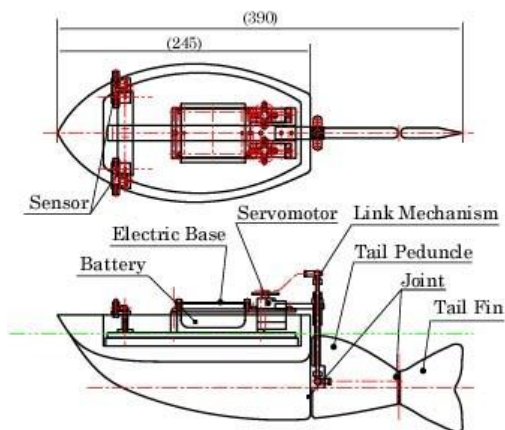


Att. 10. *Thunniform* peldēšanas tips

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.

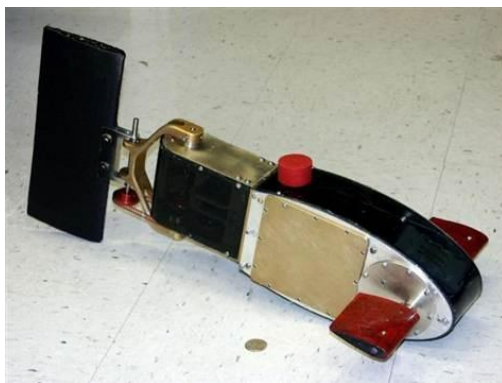
2.4. Ievērojamāko pētījumu apskats

Bionisko analogiju meklējumi sākās deviņpadsmitā gadsimta sešdesmitajos gados, un drīz tie kļuva regulāri, sistemātiski un apjomīgi. Eksperimentālas iekārtas ar spuru tipa propulsiju tika izveidotas un pētītas septiņdesmitajos un astoņdesmitajos gados klasificēti pie zemūdens transporta nozares. Pēdējos gados, pateicoties skaitļošanas mašīnu un vadības sistēmu straujai attīstībai, zemūdens robotikas jomā ir vairāki nozīmīgi atklājumi. Labs peldoša robota zivs modeļa piemērs un apraksts pieejams [12.], attēls 11.



Att. 11. NMRI zivs robots PPF-06i

Šādiem robotu modeļiem ir divu sekciju aste un attālināta mikroprocesora vadības sistēma. Šķēršļu monitoringa sistēma ļauj izvairīties no sadursmēm. Sarežģītāks zemūdens robots (zivs) tika izgatavots Vašingtonas universitātē, un arī sastāv no 3 daļām [13.], attēls 12.



Att. 12. Vašingtonas universitātes zivs robots

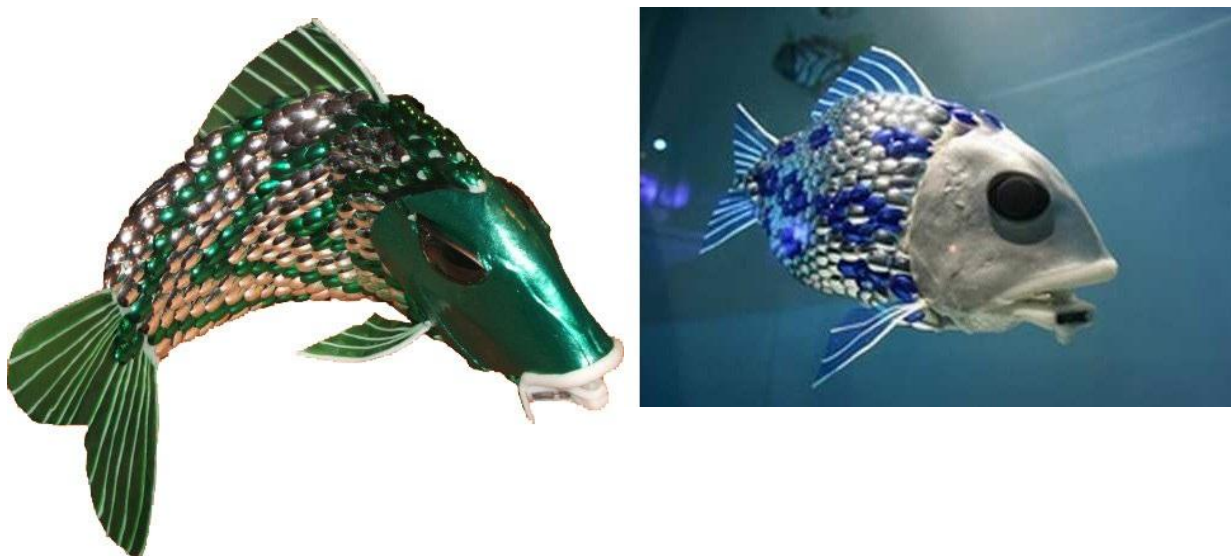
Robotam ir pilnībā autonoma mikroprocesora vadības sistēma no autonoma barošanas avota, kas iebūvēta robotā. Robota zivs piedziņu un stūrēšanu nodrošina aste un krūšu spuras, kas nodrošina robota spēju peldēt jebkurā virzienā, veikt straujus pagriezienus un pat peldēt

atpakaļ. Zemūdens robotu ar pneimatisko piedziņu [14.] ir izgatavojusi kompānija „Festo” (attēls 13.). Elektronika un pneimatika ir paglabāta ūdens necaurlaidīgā galvā un vada S-veida astes kustības ar diviem fluīdiem muskuļiem. Vēl divi aktuatori nodrošina stūrēšanu.



Att. 13. Festo zivs robots Airacuda

Augsta līmeņa pētniecības projekts norisinājies Esseksas universitātē, Apvienotajā Karalistē [15., 16.]. Robota zivs vadība ir bāzēta uz dažādiem apkārtējās vides sensoriem un aprīkota ar autonomu vadību. Robots ir spējīgs patstāvīgi pārvietoties pa ūdens vidi veiksmīgi izvairoties no šķēršļiem (attēls 14.). Esseksas universitātes pētnieku grupa ir viena no lielākajām



Att. 14. Esseksas universitātes zivs robots

pētnieku grupām Apvienotajā Karalistē un spēcīgākajām cilvēka centrētajā robotikas pētnieku grupām pasaulē. Robota bioloģiskās problēmas, peldēšanas hidromehānika, ūdens organismu kustības ir aprakstītas [15., 16.].

Jāpiemin mana personīgā dalība starptautiskajā pētniecības projektā FILOSE (Robotic Fish Locomotion and Sensing), kas ir FP7-ICT-2007-3 STREP pētniecības projekts 7th Framework Programmas ietvaros [17.]. Šī projekta pamatmērķis ir izstrādāt zivs robota modeli ar spēju sajūst apkārtējās vides plūsmas nianses tādā veidā koriģējot izvēlēto peldēšanas veidu. Informācija par teorētiskajiem pētījumiem un eksperimentiem pieejama [17.-19.]. Projektā piedalās 5 dažādu valstu universitātes, ieskaitot RTU, kuras katra gatavo noteiktu zivs robota daļu. RTU pētniecības grupas uzdevums ir sagatavot zivs robota matemātisko modeli un palīdzēt mehāniskā robota izgatavošanā. Šobrīd projekta ietvaros darbs pie zivs robota modeļa izgatavošanas turpinās (attēls 15.).



Att. 15. Projekta FILOSE zivs robota izstrādne

Secinājumi

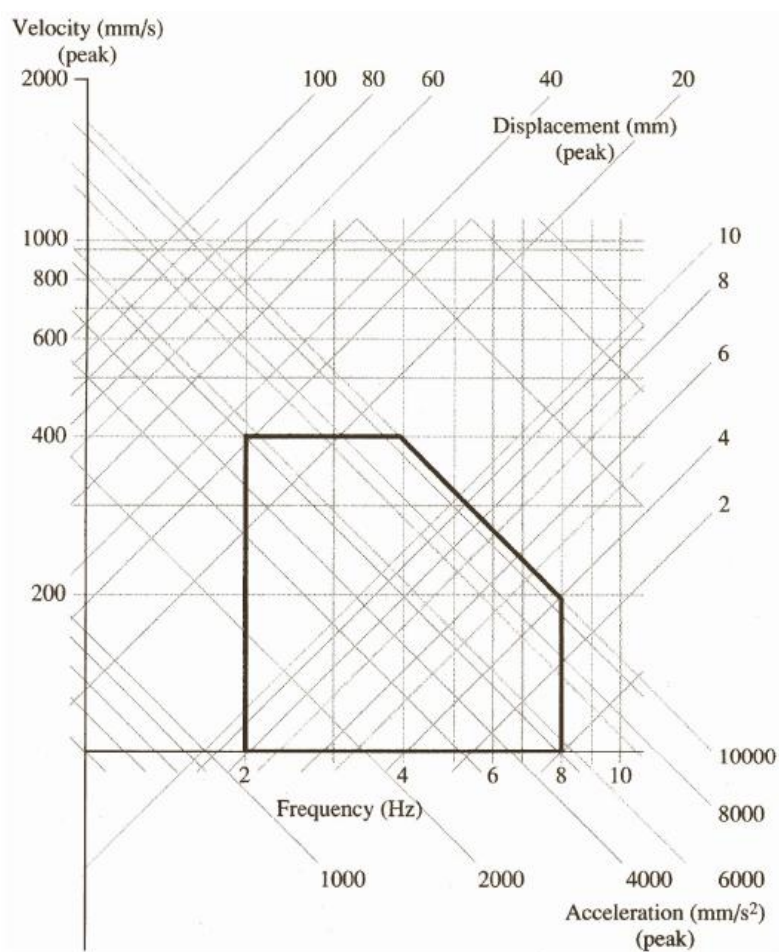
1. Veicot literatūras apskatu, konstatēts, ka darba izstrādes laikā pieejamajos apskatītajos informācijas avotos netiek pievērsta pietiekama uzmanība alternatīvām biomimētiskām propulsijas iekārtām un to izveidei. Šādu sistēmu nepieciešamība ir acīmredzama minēto esošo propulsijas iekārtu nepilnību dēļ.
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 ņēmu 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.

3. MODEĻU ANALĪZES MATEMĀTISKAIS NODROŠINĀJUMS

3.1. Matemātiskā modeļa algoritma izveide

3.1.1. Datorsimulācija un nomogrammas

Vibrāciju analīzē aktuāla problēma ir rezultātu atspoguļošana, kad modelis un interesējošās dati jau ir zināmi. Lineārām sistēmām ar vienu brīvības pakāpi analītiskais risinājums ir slēgta tipa un var tikt vienkārši attēlots līknes veidā. Vēsturiski datorizācijas process šajā jomā ir bijis grūts un izejošie dati tika pasniegti uz nomogrammām (att. 3.1.1), kas sastāvēja no maksimālo amplitūdu un vibrācijas ātrumu līknēm, kā arī paātrinājumu un frekvenču līknēm vienā divdimensionālā, četru asu grafikā. Šādos grafikos ir relatīvi vienkārši norādīt pieļaujamās vibrācijas, kas arī redzams attēlā. Šī pieeja ir noderīga arī šobaltdien un tiek pielietota militārajās un dažu ražotāju specifikācijās, tomēr plašā ātrgaitas datoru un rēķināšanas kodu jeb programmu pieejamība ir izveidojusi tendenci



3.1.1. att. nomogramma

rezultātus attēlot laika grafikos. Tālāk tiek apskatīts parasts datorsimulācijas paņēmieni vibrāciju aprēķiniem, kuru es savā darbā izmantoju, lai veiktu aprēķinus.

3.1.2. Skaitliskās simulācijas modeļi

Plašāk lietotais modelis vibrāciju sistēmās ir modelis ar n brīvības pakāpēm, kas var tikt attēlots kā:

$$Mx(t)'' + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t),$$

$$x(0) = x_0,$$

$$\dot{x}(0) = \dot{x}_0 \tag{1}$$

kur $x(t)$ ir $n \times 1$ nobīdes koordināšu vektori, to atvasinājums $x'(t)$ ir $n \times 1$ ātrumu vektori un otrais atvasinājums $x''(t)$ ir $n \times 1$ paātrinājumu vektori. Koefficienti M , C un K attiecīgi ir $n \times n$ masas, slāpēšanas un stinguma matricas elementi. Šīs koeficientu matricas parasti ir simetriskas. Vienādojums (1) tiek izteikts no Ņūtona likumiem, enerģijas metodēm vai dinamiskajiem galīgajiem elementiem. Konstanšu vektori x_0 un \dot{x}_0 ir sistēmas sākumstāvoklis jeb sākuma nosacījumi. Simulācijas uzdevums ir atrast $x(t)$, kas apmierinātu vienādojumu (1) noteiktos t punktos un attēlot tos grafiski kā tas tiek darīts nomogrammās.

Pašlaik ļoti daudzi labi uzrakstīti skaitliskās integrēšanas kodi jeb programmas ir komerciāli brīvi pieejami par zemāku cenu nekā maksātu tādu izveidot, neņemot vērā iespējamo kļūdu skaitu. Koda, kas tiek izmantoti tādu vienādojumu kā (1) aprēķināšanai izmanto atvasinājumu definīciju, un gandrīz visi pieprasa ievadīt kustības vienādojumu pirmajā formā, tas ir divu laika atvasinājumu vietā tikai vienu. Vienādojumu (1) var viegli pārvērst pirmās pakāpes diferenciālvienādojumā izmantojot vienkāršas manipulācijas ar matricām.

Ja masas matricai M eksistē apgrieztā jeb inversā matrica, tad otrās pakāpes vibro modelis no vienādojuma (1.) var tikt uzrakstīts kā ekvivalents pirmās kārtas vienādojums izmantojot jaunas koordinātes definējot ar $2n \times 1$ vektoru:

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix},$$

ja pieņem, ka $z_1 = x(t)$ un $z_2 = \dot{x}(t)$, tad vienādojumu (1) var pārfrāzēt kā

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = -M^{-1}Kz_1 - M^{-1}Cz_2 + M^{-1}f(t)$$

$$z(0) = \begin{bmatrix} x_0 \\ \dot{x}_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

kurus apvieno formā

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Az + F(t), \\ z(0) &= z_0 \end{aligned} \quad (3)$$

Šeit z tiek saukts par stāvokļa vektoru un matricu definē:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad (4)$$

kur I ir $n \times n$ identitāšu matrica un O ir $n \times n$ nulļu matrica. Funkcija $F(t)$ ir "masa" sadalīta $2n \times 1$ vektoros

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}f(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

kur O norāda $n \times 1$ nulļu vektorus. Jāpiezīmē, ka risinot vibro uzdevumus lietojot šādu koordinātu sistēmu, pirmās n vektora $z(t)$ komponentes sakrīt ar individuālajiem n kustību brīvības pārvietojumiem.

3.1.3. Skaitliskā integrēšana

Vienādojuma (1) skaitliskais risinājums jeb simulācija ir vieglāk apskatāma, ja vispirms izpēta skalāru homogēnu variantu:

$$\begin{aligned}x(t) &= \dot{ax}(t) \\ x(0) &= x_0,\end{aligned}$$

kur a ir vienkārša konstante. Atvasinājumu $x'(t)$ pēc definīcijas pieraksta:

$$\frac{x(t_1 + \Delta t) - x(t_1)}{\Delta t} = ax(t_1), \quad (6)$$

kur Δt ir galīgs laika intervāls. Šo izteiksmi pārveidojot sanāk:

$$x(t_1 + \Delta t) = x(t_1) + ax(t_1)\Delta t \quad (7)$$

vai lietojot vienkāršāku apzīmēšanu

$$x_{i+1} = x_i + ax_i\Delta t, \quad (8)$$

kur ar x_i apzīmē $x(t_i)$. Šī formula dod x_{i+1} vērtību “nākamajā” laika sprīdī, kuru nosaka koeficients a , laika sprīdis Δt un iepriekšējā x_i vērtība. Tādā veidā sākot ar noklusējuma jeb sākuma vērtību x_0 , risinājums tiek veikts pa laika solim, kamēr uzstādītais laika intervāls netiek izpildīts. Šī vienkāršā skaitliskā metode tiek saukta par Eilera formulu vai tangensa līnijas metodi, un sevī ietver tikai saskaitīšanu un reizināšanu. Protams, jo mazāks laika sprīdis Δt , jo precīzāka ir aproksimācija (atvasinājums pēc definīcijas tiecas uz nulli $\Delta t \rightarrow 0$). Tomēr diemžēl, samazinot soli Δt pagarinās datorrēķina laiks. Arī skaitliskās kļūdas (noapaļošana un noīsināšana) neļauj simulācijām kļūt ideālām, un lietotājam vienmēr vajadzētu pārliicināties par rezultātu atbilstību.

Likums kādā veidā tiek veikta simulācija bieži tiek saukts par algoritmu. Viens veids kā uzlabot skaitliskā risinājuma precizitāti ir lietot sarežģītākus algoritmus. 1800 gadu beigās C. Runge un M.W.Kutta izstrādāja pāris gudras formulas kā uzlabot vienkāršās tangensa jeb Eilera metodes. $x(t + \Delta t)$ tiek vērtētas kā Teilora rindas pakāpē Δt . Runge-Kuttas ar savu metodi iestarpina papildus vienumus starp x_i un x_{i+1} , lai paredzētu augstākās kārtas atvasinājumu teilora paplašinājumā tādā veidā uzlabojot simulācijas precizitāti.

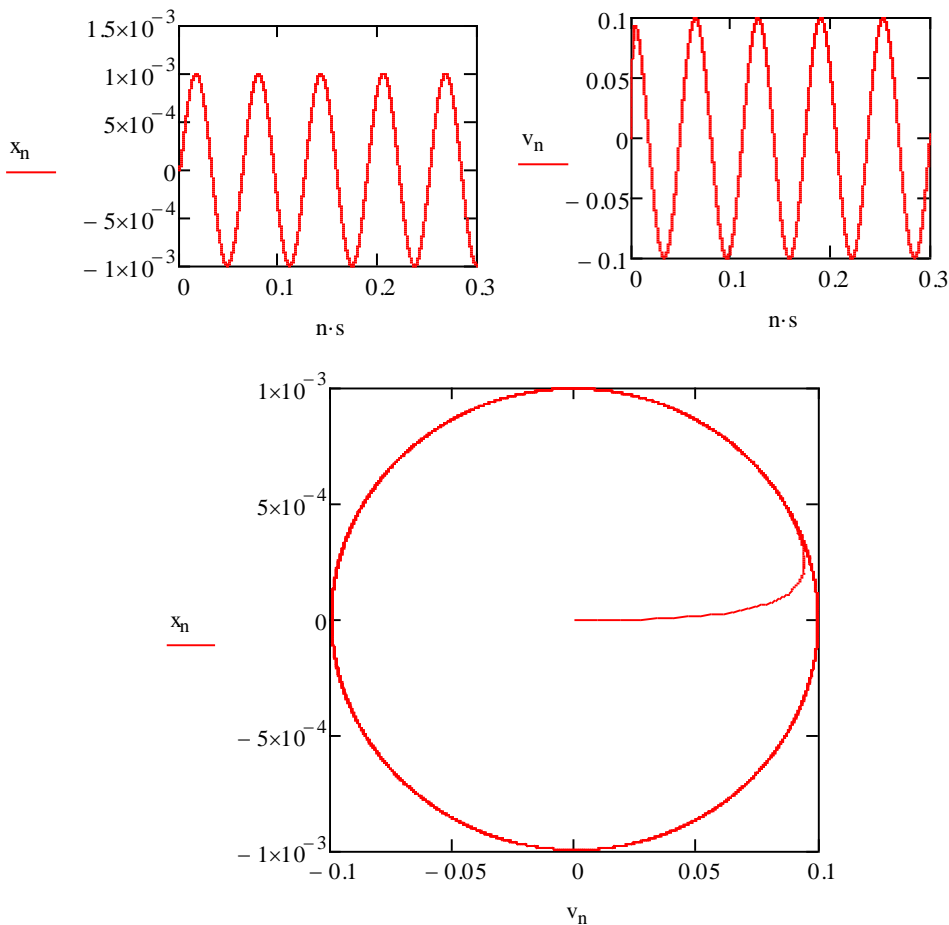
Cits veids kā uzlabot simulācijas rezultātus ir pieregulējot laika soli Δt pēc tā cik strauji risinājums $x(t)$ mainās. Ja katrs nākamais i -tais risinājums no iepriekšējā krasi neatšķiras, var izmantot lielāku Δt soli. Turpretī, ja $x(t)$ vērtība mainās strauji, jāizvēlas mazs Δt . Parasti algoritmā šādas integrācijas soļa maiņas jau ir paredzētas.

Šādu algoritmu (3.9) ir iespējams kalkulet arī programmā MATHCAD (att.3.1.2), kuru es lietoju, lai šajā darbā veiktu teorētiskos aprēķinus. Zemāk parādīts uzskatāms piemērs ietver atsperē ar demferi iekārtu masu. Uzskatāmības labad gravitācijas ietekme nav ņemta vērā. Risināmā uzdevuma spēku summa ir $-b \cdot v_n - c \cdot x_n + A \cdot \cos(\omega \cdot n \cdot s)$, kur Δt ir solis s , kas reizināts ar integrēšanas soļu skaitu n , tātad simulācijas laiks $3000 \cdot 0,0001 = 0,3s$.

$$m := 1 \quad \omega := 100 \quad A := 100 \quad b := 1000 \quad c := 10$$

$$n := 0..3000 \quad s := 0.000$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} x_n + s \cdot v_n \\ v_n + \frac{s}{m} \cdot (-b \cdot v_n - c \cdot x_n + A \cdot \cos(\omega \cdot n \cdot s)) \end{bmatrix} \quad (9)$$



3.1.2. att. grafiskie rezultāti programmā MATHCAD

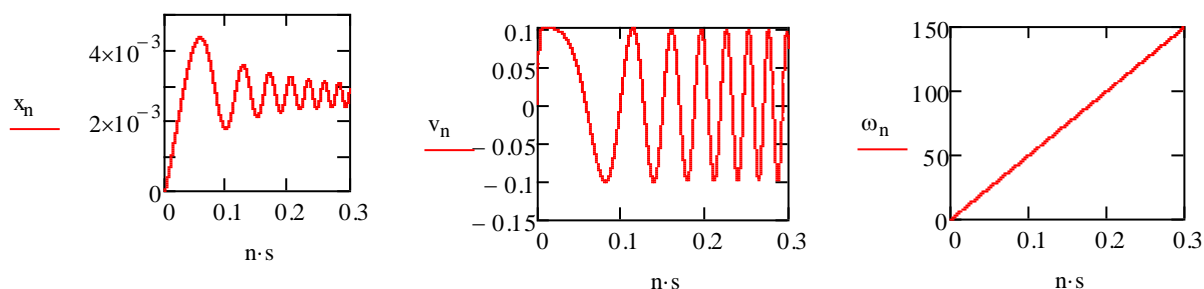
Grafikos 3.1.2 viegli un uzskatāmi var redzēt objekta kustību laikā $x(t)$, ātrumu laikā $v(t)$, kā arī objekta kustību fāzu plaknē. Iespējami arī citi grafiskie attēlojumi.

Pētniecības vajadzībām ļoti ērti ir izmantot laikā mainīgus parametrus. Tas ļauj ātri noteikt matemātiskā modeļa kritiskās un citas interesējošās zonas atkarībā no konkrētā parametra vērtības. Šajā sakarā algoritmā ievadam papildus mainīgo. Piemērā (9) kustības frekvenci nosaka parametrs ω . To ievadam kā jaunu mainīgo, izveidojot papildus rindu matricās.

$$B := 500$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ \omega \\ v_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x_{n+1} \\ \omega_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} x_n + s \cdot v_n \\ n \cdot s \cdot B \\ v_n + \frac{s}{m} \cdot (-b \cdot v_n - c \cdot x_n + A \cdot \cos(\omega_n \cdot n \cdot s)) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Konstante B tiek ieviesta, lai kontrolētu parametra ω pieaugumu. Dotā gadījumā simulācijas laika sprādis sastāda $n \cdot s = 3000 \cdot 0,0001 = 0,3s$. Pie konstantes vērtības $B=500$ simulācijas laikā parametrs ω lineāri sasniegs vērtību $\omega_{3000} = 0.3 \cdot 500 = 150$, kas labi redzams grafiskajos rezultātos (att 3.1.3.). Pretstatā, algoritmā ar konstantu frekvenci, ω vērtība ir konstanta $\omega=100$.



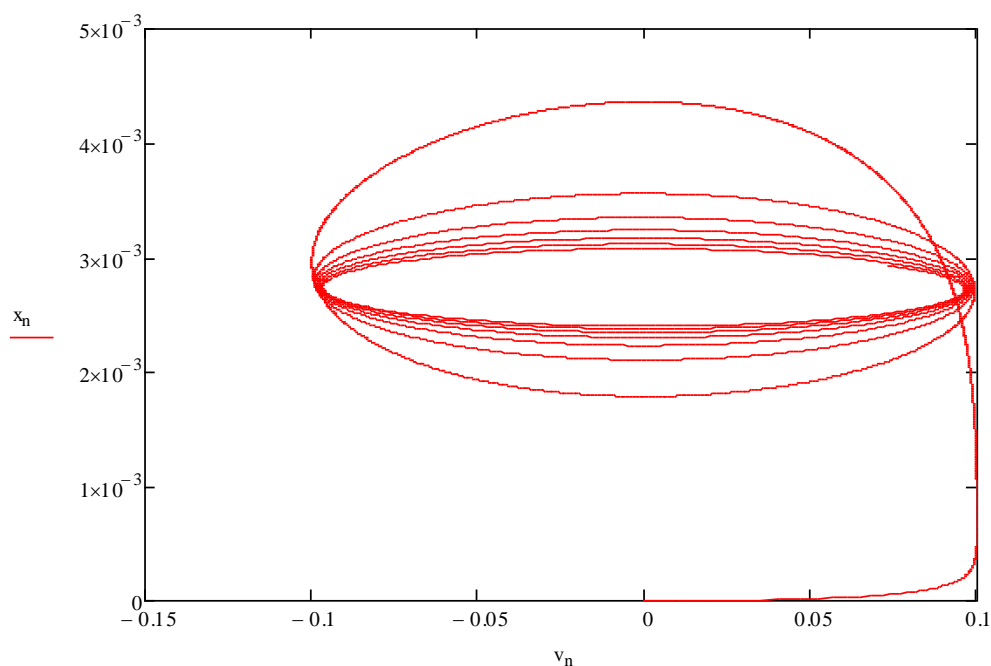
Šī metode var tikt uzskatīta par jaunievedumu matemātisko modeļu optimizācijas uzdevumu risināšanai programmā MathCad.

Propulsīvās iekārtas efektivitātes aprēķināšanai izmantojam ievadītās un iegūtās jaudas attiecību procentos:

$$\eta = \frac{J_{iegūtais}}{J_{ievadītais}}; \quad (11)$$

Ievadīto jaudu aprēķinām integrējot propulsīvās iekārtas (astes) kustības radošā momenta absolūtās vērtības un relatīvā astes ātruma absolūtās vērtības reizinājumu zonā, kurā astes kustība un objekta kustība vairāku ciklu garumā ir konstanta. Iegūto jaudu aprēķinām kā

propulsijas vilces spēka absolūtās vērtības un objekta ātruma absolūtās vērtības reizinājumu tajā pašā zonā.



Att. 3.1.3. Matemātiskā modeļa ar lineāri mainīgu konstanti datorsimulācijas grafiskie rezultāti.

Secinājumi

1. 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.
2. Izveidotais simulācijas aprēķinu algoritms ir pietiekami elastīgs, lai tajā varētu pētīt apskatīto tipu un līdzīgas mehāniskās sistēmas; atklātā parametra optimizācijas metode ir labs paņēmieni kā viegli atrast optimālu parametra vērtību bez papildu aprēķiniem.
3. 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.

4. PELDOŠU OBJEKTU MODEĻU ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA

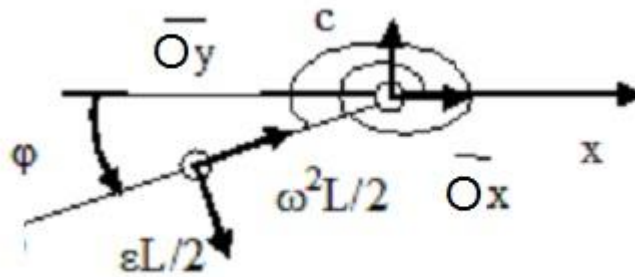
4.1. Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi

Vienkārša peldoša robota modeļa ar propulsiju izveidei var aprobežoties ar divām konstruktīvām daļām – robota pamatkorpus 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. 4.1.1. Vienkāršots robota modelis

Lai pareizi sastādītu visu spēku vienādojumu saskaņā ar otru 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 4.1.3. Normālspēkus sadalot pa asīm, iegūstam sānspēkus un vilces spēkus. Vilces spēki summējas radot kopējo vilci, bet sānspēki viens otru izlīdzina. Tā kā 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 korpuss 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. 4.1.1., 4.1.2.).



Att. 4.1.2. Astes shēma

Astes kustībām izmantoju harmonisku ierosmi

$$M(t, \varphi, \dot{\varphi}) = M_0 \sin(kt), \quad (12)$$

kur:

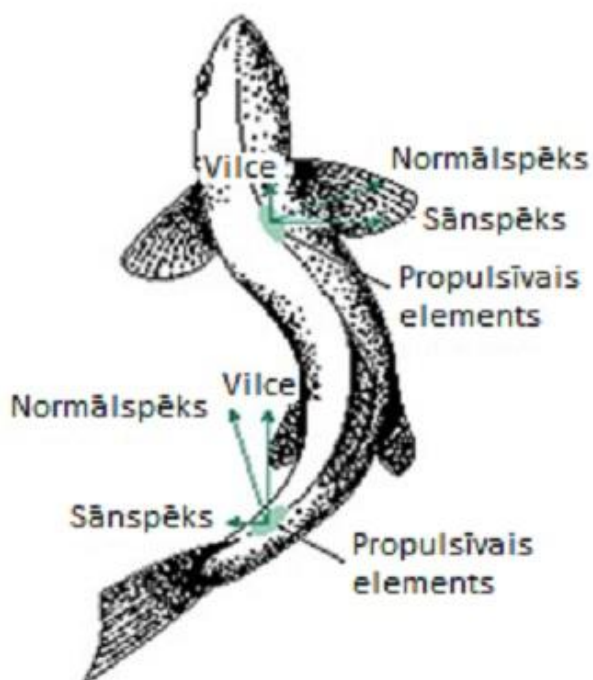
k, M_0 – konstante

$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}$ – astes leņķiskais ātrums

Starp korpusu un asti ievietota atspere ar lineāru raksturlielni $c\varphi$, kā arī svārstības slāpējošs elements $b\dot{\varphi}$,

kur:

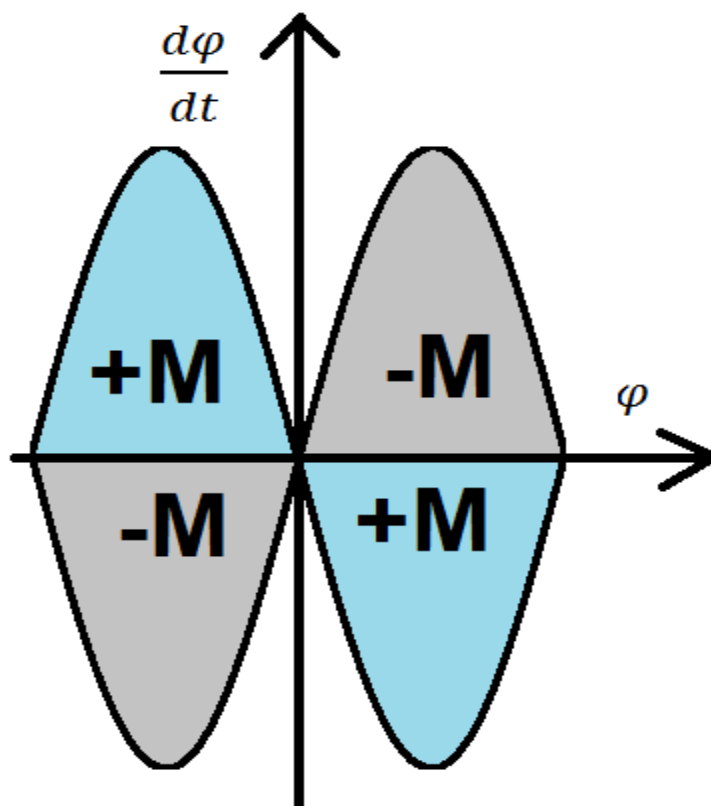
b, c – konstantes



Att. 4.1.3. Zivs kustības pamatspēki

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, kalkulējot 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 (13) (att. 4.1.4.):

$$M = f(t) \tag{13}$$



Att. 4.1.4. Momenta harmoniskā ierosme

Harmonisko ierosmi visvienkāršāk realizēt ar kādu no cikliskajām trigonometriskajām funkcijām. Izmantojam *sinus* funkciju, kura piešķir pozitīvu vai negatīvu vērtību atkarībā no laika vērtības.

$$M(t) = M_0 \cdot \sin(k \cdot t) \quad (14)$$

Ņemot vērā augstāk minētos apgalvojumus, sastādām sistēmas matemātisko modeli:

$$J_A \cdot \ddot{\varphi} = M(t) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} - k_1 \cdot B \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \int_0^L (\dot{\varphi} \cdot \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi, \quad (15)$$

kur:

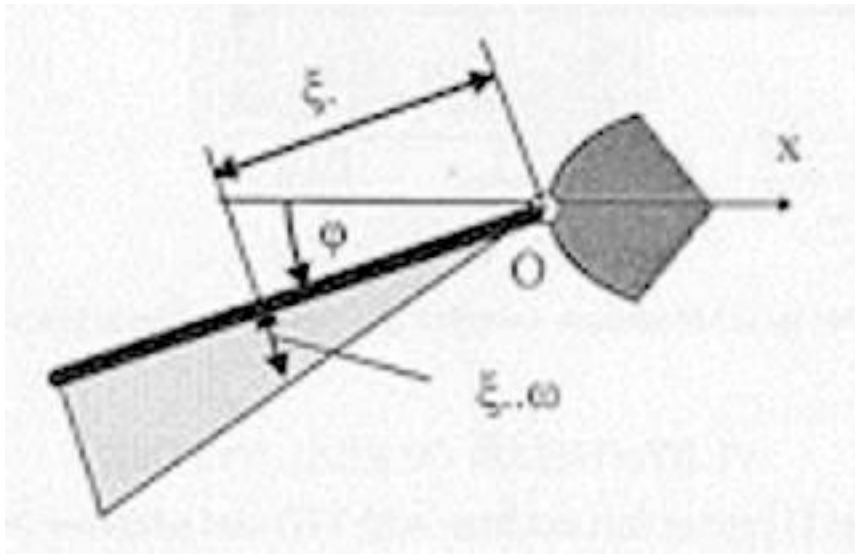
J_A – astes inerces moments pret z asi caur O punktu;

$\ddot{\varphi}$ – astes leņķiskais paātrinājums;

$\int_0^L (\dot{\varphi} \cdot \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi$ – integrālis ūdens pretestības spēku noteikšanai (att. 4.1.5.);

L – astes garums;

c, b, k_1, B – konstantes.



Att. 4.1.5. Spēki uz asti

No masas centra kustības teorēmas, kur astes masas centrs m svārstās ap Ox asi, iegūstam (16):

$$\begin{aligned} m \cdot \left(\dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos\varphi + \ddot{\varphi} \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin\varphi \right) = \\ = O_x - k_1 \cdot B \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \left(\int_0^L (\dot{\varphi} \cdot \xi)^2 \cdot d\xi \right), \end{aligned} \quad (16)$$

kur:

O_x – astes reakcija šarnīrā O x ass virzienā.

No (15) un (16) iegūstam (17) un (18):

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} + (-k_1 \cdot B \cdot \text{sign}(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^4}{4}) \right]; \quad (17)$$

$$Ox = m \cdot \left\{ \begin{aligned} & \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{J_A} \cdot \\ & \cdot \left[M(t) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} + (-k_1 \cdot B \cdot \text{sign}(\varphi) \cdot \dot{\varphi} \cdot \frac{L^4}{4}) \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi) \end{aligned} \right\} + k_1 \cdot B \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^3}{3} \quad (18)$$

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. Saites reakcijas spēku matemātiski var izteikt sekojoši (19), [17]:

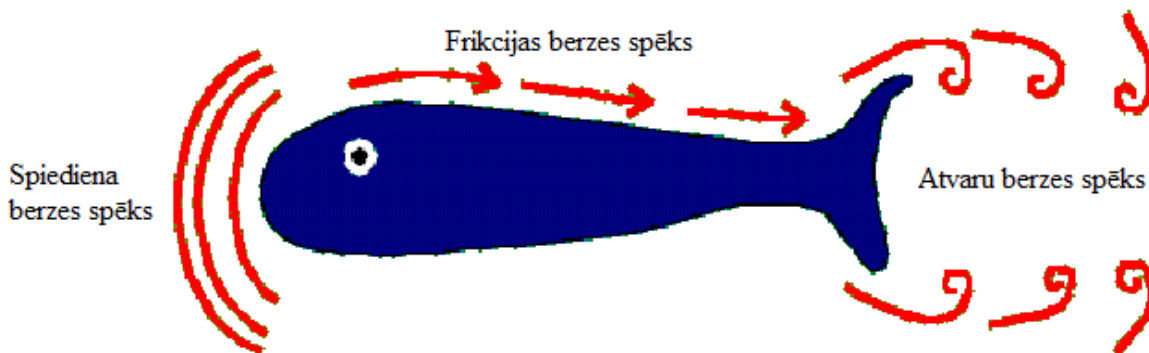
$$K = -\int_0^T \left(\begin{aligned} & m \cdot \left\{ \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t, \varphi, \dot{\varphi}) - c \cdot \varphi - k_t \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^4}{4} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi) \right\} + \\ & + k_t \cdot B \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^3}{3} \end{aligned} \right) \cdot dt, \quad (19)$$

kur T – laika intervāls.

Šādā veidā pieliktā momenta izmaiņas rezultātā var atrast kritēriju K .

Kad zivs atrodas kustībā, tai jāpārvar apkārtējās vides radītā pretestība. Šo pretestību var sadalīt vairākās daļās (att. 4.1.6.):

- 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. 4.1.6. Apkārtējās vides iedarbības spēki

Dotajā matemātiskajā modelī pieņemam, ka korpusa spiediena berzes spēks ir ar kubisku raksturlīkni:

$$Fb_s = b_1 \cdot \dot{\varphi} + b_2 \cdot \dot{\varphi} \cdot |\dot{\varphi}| + b_3 \cdot (\dot{\varphi})^3, \quad (20)$$

kur b_1, b_2, b_3 – const (skat. Pielikumā „pētījumi vēja tunelī”);

Korpusa un astes frikcijas berzes spēks:

$$Fb_f = C \cdot a \cdot L \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (21)$$

Atvaru berzes spēku vērā neņemam.

Izveidojam matemātisko modeli programmā Mathcad:

$$\begin{aligned} L &:= 0.4 & m &:= 1 & J0 &:= m \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2 \\ M0 &:= 20 & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & B &:= 0.01 & b &:= 5 & c &:= 20 \\ n &:= 0..7000 & s &:= 0.000 & t_n &:= n \cdot s \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ \omega_n + \frac{s}{J0} \cdot \left[M0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

kur:

L – astes garums [m];

m – astes masa [kg];

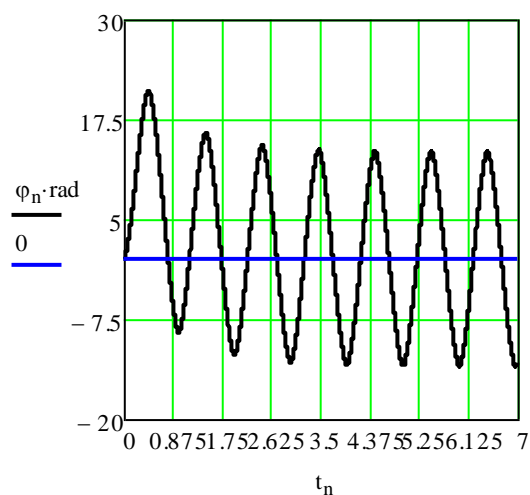
$J0$ – astes inerces moments [kgm²];

$M0, k, KT, B, b, c$ – konstantes;

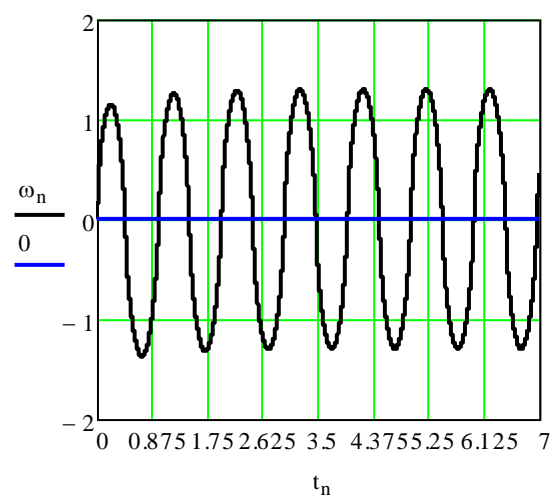
n – simulācijas soļu skaits;

s – simulācijas soļa izmērs;

Iegūstam sekojošus grafiskus rezultātus:

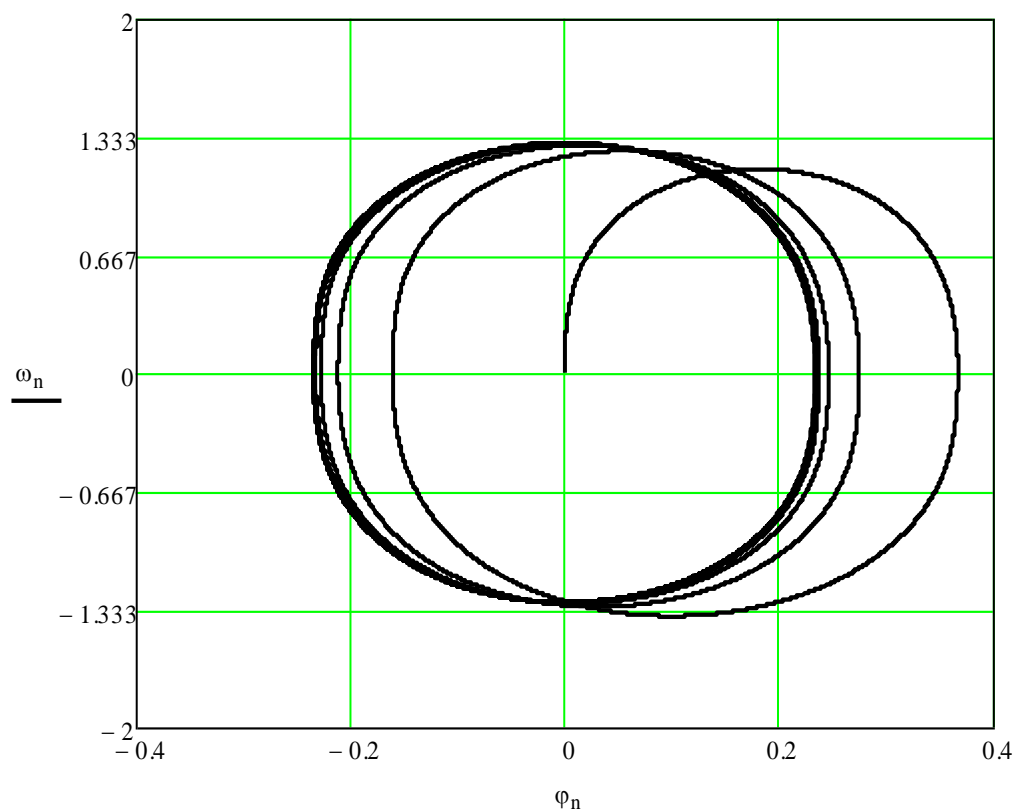


Att. 4.1.7. astes pagrieziņa leņķis



Att. 4.1.8. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums

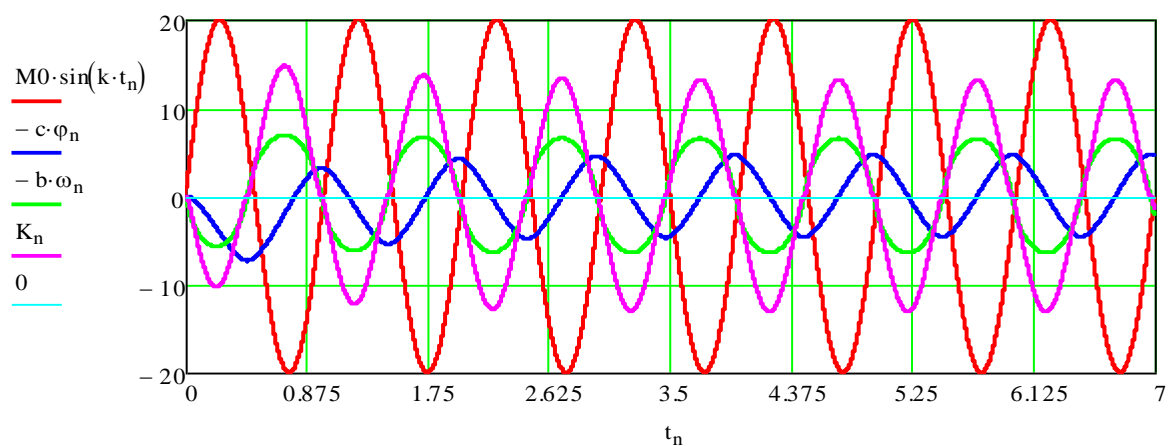
Attēlos 4.1.7. un 4.1.8. redzam astes pagrieziņa leņķi φ laikā t un astes pagrieziņa leņķisko ātrumu ω laikā t . Astes pagrieziņa leņķa vērtības uzskatāmības labad norādītas grādos, ne radiānos. Abscisu ass gradēta sekundēs. Simulācijas laiks 7 sekundes izvēlēts tā, lai matemātiskais modelis šajā laikā paspētu iegūt stacionāru, stabilu darba režīmu. Tas labi redzams astes pagrieziņa leņķa φ un leņķiskā ātruma ω fāzu plaknē attēlā 4.1.9.



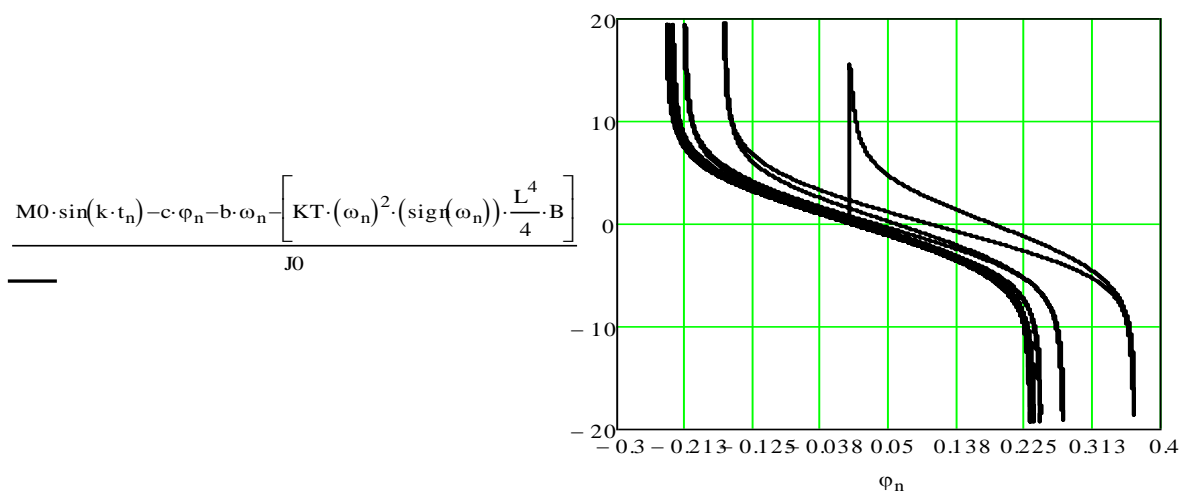
Att. 4.1.9. Astes kustība fāzu plaknē.

Astes kustība sākas no „0” stāvokļa (tādi sākuma nosacījumi) un pēc 3 pilniem periodiem jau atrodas gandrīz stacionārā režīmā.

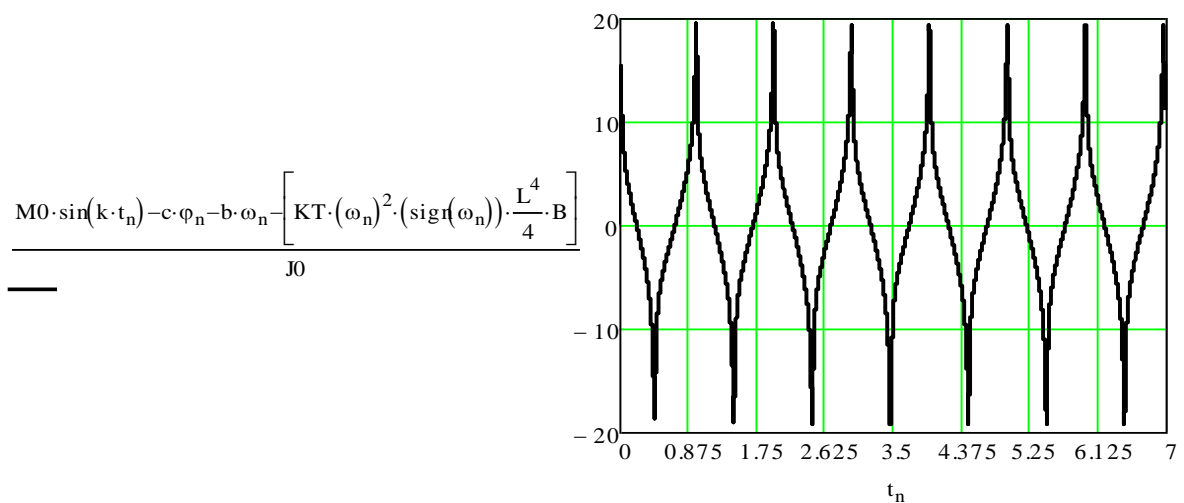
Aplūkojot ūdens pretestības radīto spēku, atsperes radīto spēku, demfera radīto spēku un pielikto harmonisko momenta spēku vienā grafikā varam pārliecināties, ka harmoniskais vadības momenta radītais spēks diametrāli pretēji mainās ar pārējiem spēkiem, kuri tam pretojas, kā tam arī vajadzētu būt (att. 4.1.10.). Astes paātrinājumi laikā un pārvietojuma fāzu plaknē grafiski attēloti attēlos 4.1.11. un 4.1.12.



Att. 4.1.10. Astes kustību ietekmējošie spēki laikā.



Att. 4.1.11. Astes paātrinājums kustības fāzu plaknē.

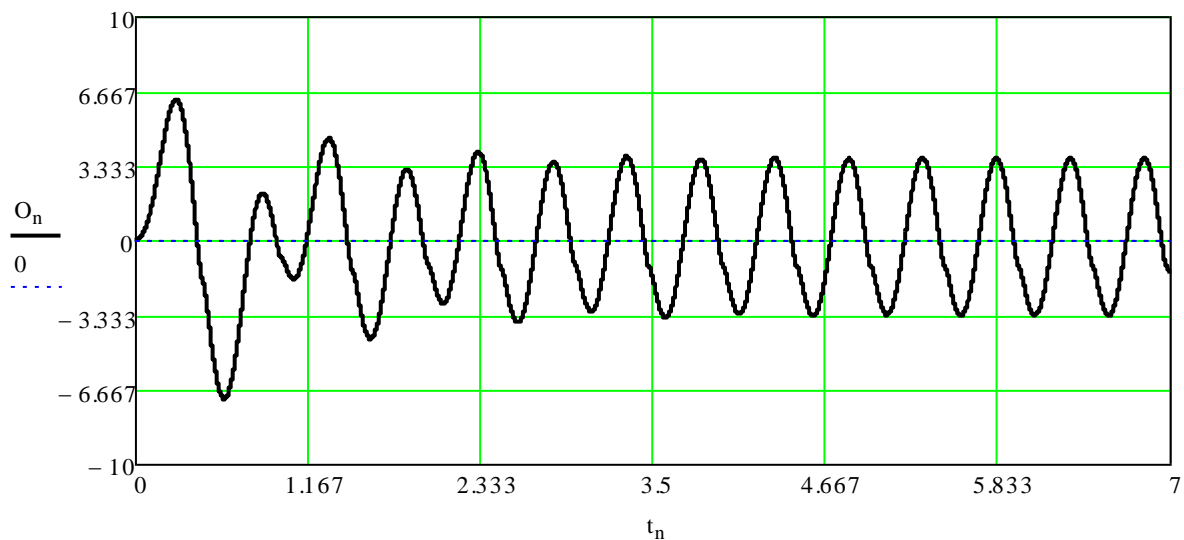


Att. 4.1.12. Astes paātrinājums laikā.

No (18) iegūstam reakcijas spēku šarnīrā:

$$O_n := m \cdot \left[(\omega_n)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi_n) + \left[\frac{(M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n) + K_n \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right) \dots}{J_0} + KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^3}{3} \cdot B \cdot \sin(\varphi_n) \right] \right] \quad (21)$$

Un tā grafisko attēlojumu:



Att. 4.1.13. Astes radītā reakcija šarnīrā.

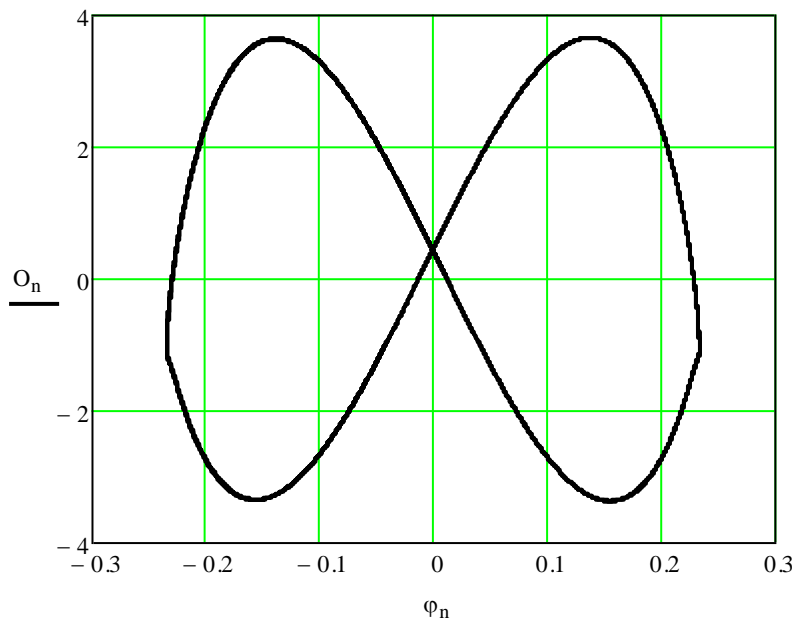
No attēlā 4.1.13. redzamā grafika redzams, ka stabils režīms tiek iegūts aptuveni sestajā periodā, tomēr vizuāli noteikt spēka vidējo vērtību nav iespējams. Tāpēc izveidojam visu aprēķina soļu tabulu (tabula 4.1.1.) un tajā izvēlamies soļu diapazonu ar veseliem periodiem,

kurā kustība jau ir nostabilizējusies, izvēlamies aprēķina soļus, kuru argumenta vērtības visvairāk tuvojas nullei. Dotā gadījumā izvēlos pēdējos 4 veselos kustības periodus, tiem atbilst aprēķina soļi 47105 un 67098 (pēdējais tabulā nav attēlots). Iegūstam grafiski:

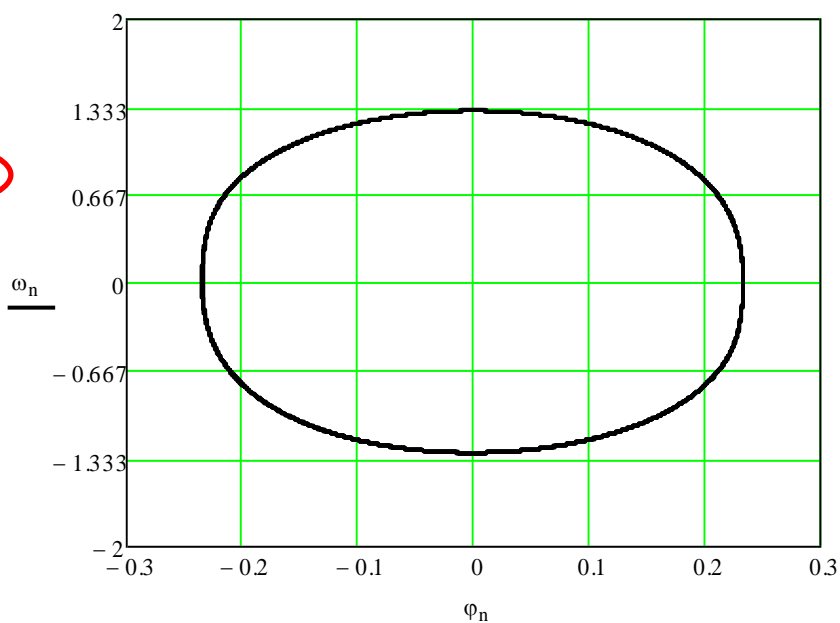
Tabula 4.1.1.

$O_n =$

	0
47085	-0.089
47086	-0.085
47087	-0.08
47088	-0.076
47089	-0.071
47090	-0.067
47091	-0.062
47092	-0.058
47093	-0.053
47094	-0.049
47095	-0.044
47096	-0.039
47097	-0.035
47098	-0.03
47099	-0.026
47100	-0.021
47101	-0.017
47102	-0.012
47103	$-7.554 \cdot 10^{-3}$
47104	$-2.998 \cdot 10^{-3}$
47105	$1.558 \cdot 10^{-3}$
47106	$6.114 \cdot 10^{-3}$
47107	0.011
47108	0.015
47109	0.02
47110	0.024
47111	0.029
47112	0.033
47113	0.038
47114	0.043
47115	...



Att. 4.1.14. Astes radītā reakcija šarnīrā regulāros periodos.



Att. 4.1.15. Astes kustība fāzu plaknē regulāros periodos.

Pēc attēlā 4.1.14. redzamās astes reakcijas spēka šarnīrā un pagrieziena leņķa fāzu plaknē, kā arī attēlā 4.1.15 astes kustības fāzu plaknē varam pārliecināties, ka izvēlētie periodi pārklājas un kustības režīms tiešām ir stabils. Tomēr, lai precīzi noteiktu vidējo astes radīto reakcijas spēku šarnīrā, nepieciešams integrēt reakcijas spēku šarnīrā un izdalīt ar kopīgo soļu skaitu:

$$S_x := \sum_{n=47105}^{67098} (O_n) \quad (22)$$

$$\frac{S_x}{67098 - 47105} = -0.013$$

kur:

S_x - reakcijas spēka šarnīrā integrālis soļu intervālā 47105 – 67098.

Iegūtais vidējais reakcijas spēks ir -0.013 N, kas rada impulsu vajadzīgā virzienā, tomēr ir gaužām niecīgs.

Lai pārbaudītu, kādu iespaidu šis reakcijas spēka šarnīrā impulss rada uz peldošu objektu, izveidojam peldoša objekta vienādojumu sistēmu:

$$m \cdot \ddot{x} = -O_x - b(\dot{x}, \dot{x}^2, \dot{x}^3) - \frac{A \cdot C \cdot \rho \cdot \dot{x}^2}{2} \quad (23)$$

kur

m – peldošā objekta masa;

A, b, C – konstantes.

Izveidojam matemātisko modeli programmā Mathcad:

$$\begin{aligned} A &:= 0.030 \text{ m} & \rho &:= 1000 \text{ kg/m}^3 & Lk &:= 1 & m1 &:= \rho \cdot A \cdot Lk \\ \rho &:= 1000 & b1 &:= 8.1 & b2 &:= -1 & b3 &:= 0.001 & C &:= 1 \\ n &:= 0..7000 & s &:= 0.000 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} x_n + s \cdot v_n \\ v_n + \frac{s}{m1} \cdot \left[-O_n - b1 \cdot v_n - b2 \cdot v_n \cdot |v_n| - b3 \cdot (v_n)^3 - C \cdot (\sqrt{A} \cdot Lk \cdot 4 + B \cdot 2) \cdot \frac{\rho \cdot v_n \cdot |v_n|}{2} \right] \end{bmatrix}$$

kur:

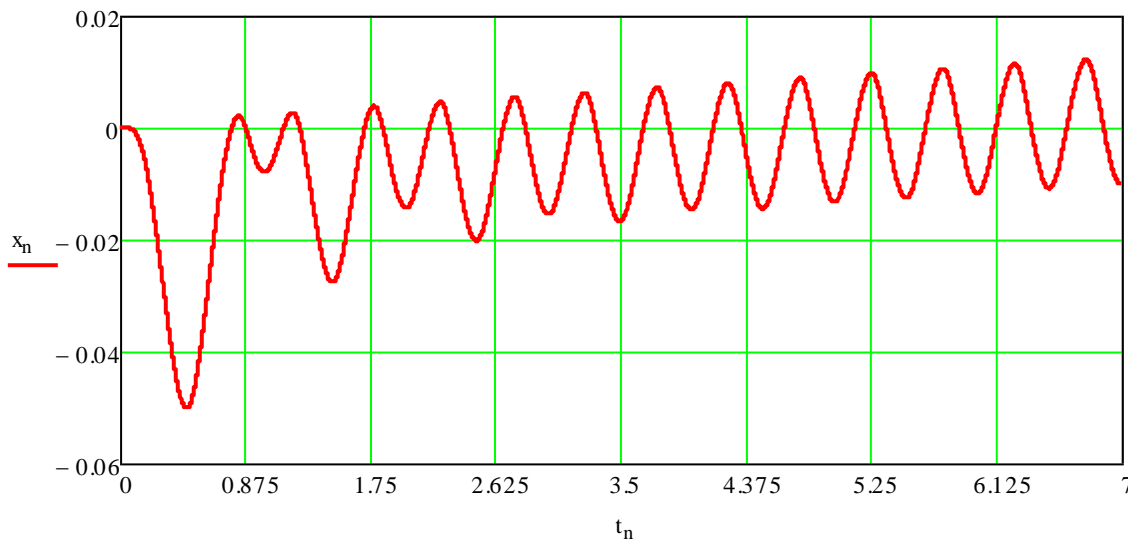
m – kuģa masa [kg];

A – korpusa priekšējās virsmas laukums [m²];

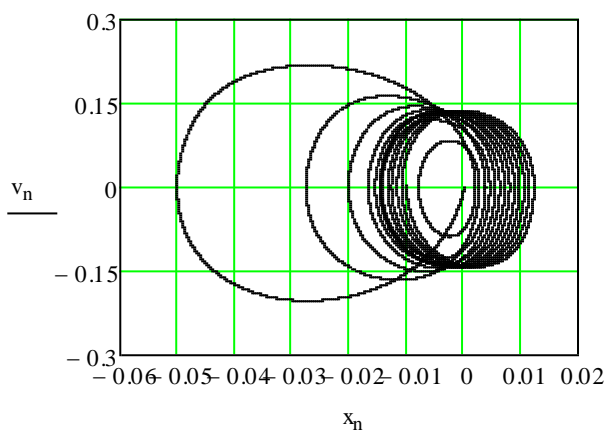
Lk – korpusa garums [m];

$\rho, \rho_0, b_1, b_2, b_3, C$ – konstantes.

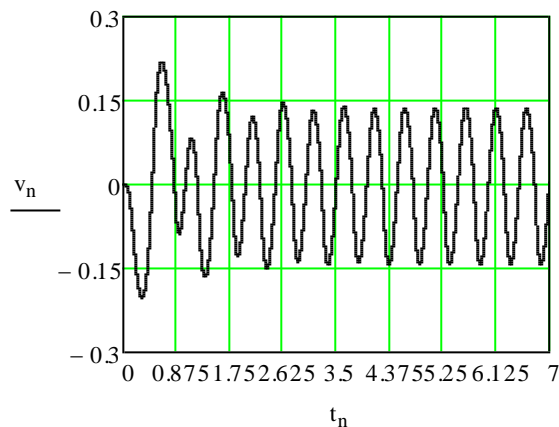
Iegūstam sekojošus korpusa pārvietojuma, ātruma kustības laikā (att. 4.1.16., 4.1.18.) un fāzu plaknē (att. 4.1.17) grafiskos rezultātus:



Att. 4.1.16. Korpusa pārvietojums laikā.

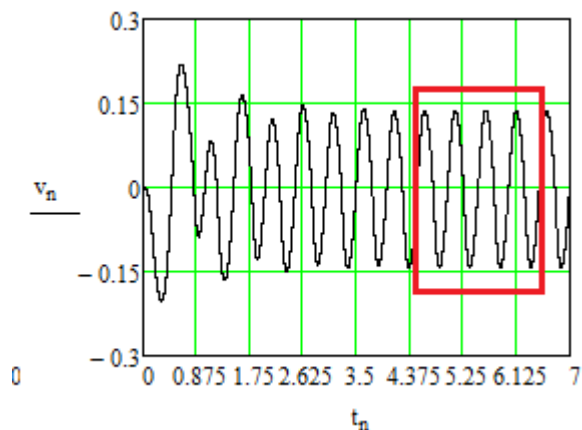


Att. 4.1.17. Korpusa kustība fāzu plaknē.



Att. 4.1.18. Korpusa ātrums laikā.

Kā redzams no grafiskajiem attēlojumiem, korpusa kustība atbilstoši propulsijas spēkam ir pozitīva. Nosakām korpusa vidējo ātrumu, izvēloties stabili darbības diapazonu ar veseliem periodiem (att 4.1.18.). Iegūstam šo diapazonu $n = 44945 \dots 64948$.

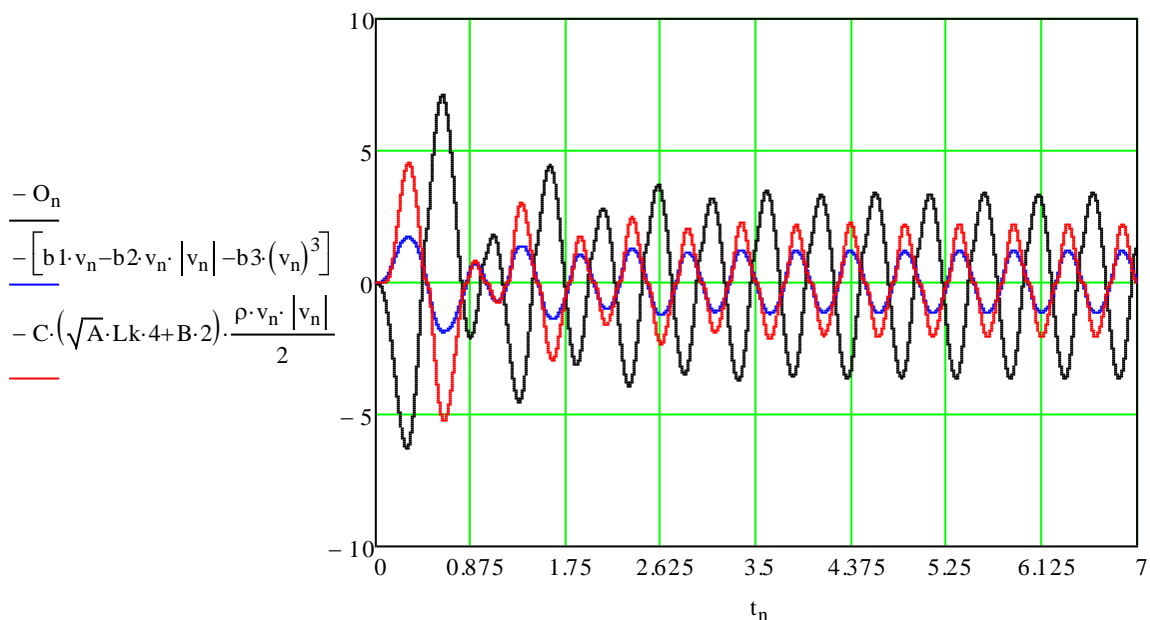


Att. 4.1.19. Izvēlētie periodi vidējās ātruma vērtības noteikšanai.

Noskaidrojam vidējo ātruma vērtību dotajā soļu diapazonā:

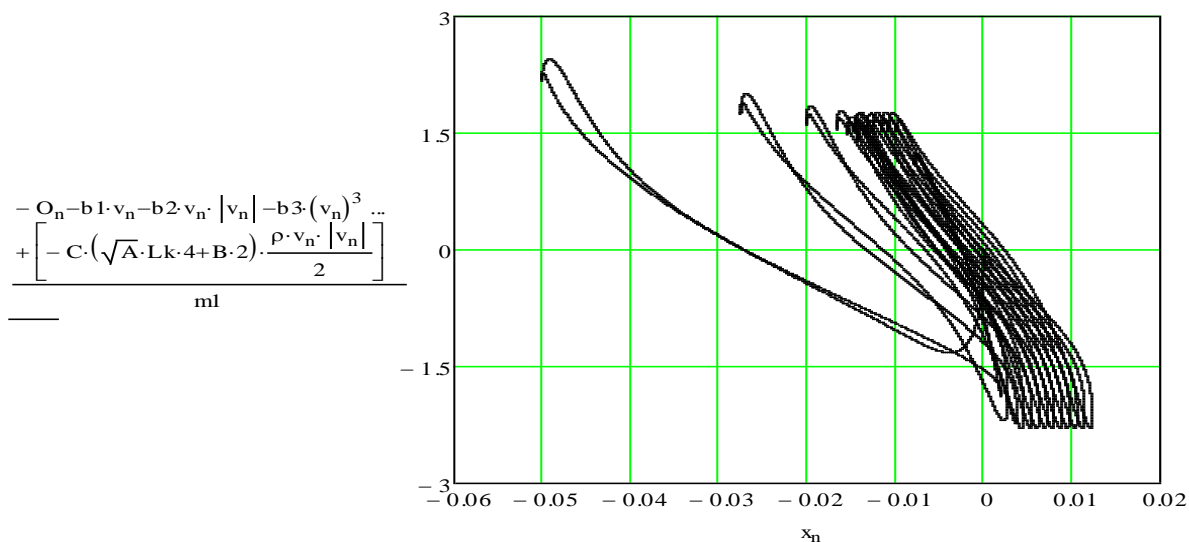
$$V_x := \sum_{n=44945}^{64948} (v_n) \quad \frac{V_x}{64948 - 44945} = 0.00182$$

Iegūtais vidējais korpusa ātrums ir 1.82 mm sekundē, kas ir gaužām niecīgs, kādu arī varēja sagaidīt pie dotā astes impulsa vērtības. Attēlā 4.1.20. redzami visi spēki, kas darbojas uz korpusu (un asti – frikcijas berzes spēks) laikā. Kā jau varēja paredzēt, pretestības spēki darbojas pretēji virzes spēkam, kas apliecina matemātiskā modeļa pareizību.



Att. 4.1.20. Spēki, kas darbojas uz korpusu laikā.

Un paātrinājuma grafiks kustības fāzu plaknē (att. 4.1.21.):



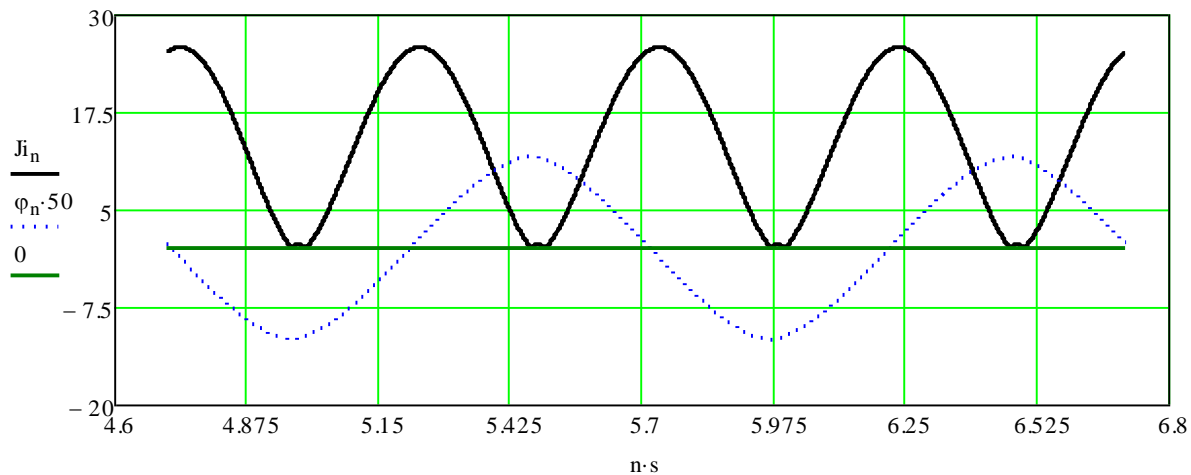
Att. 4.1.21. Korpusa paātrinājums kustības fāzu plaknē.

Aprēķinām jaudas un lietderības koeficientu pēc (11).

Ievadīto jaudu aprēķinām pēc (24) (attēlots grafiski 4.1.22.):

$$J_{i_n} := |M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n)| \cdot |\omega_n| \quad (24)$$

$$S_{Ji} := \sum_{n=47105}^{67098} (J_{i_n}) \quad S_{ji} := \frac{S_{Ji}}{67098 - 47105} \quad S_{ji} = 13.811$$

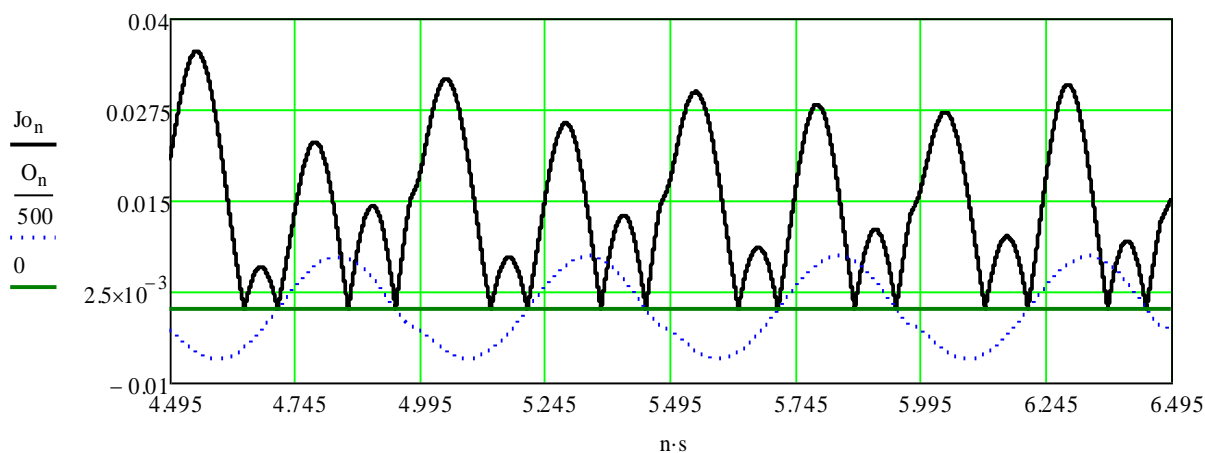


Att. 4.1.22. Ievadītās jaudas grafiks laikā.

Iegūto jaudu aprēķinām pēc (25) (attēlots grafiski 4.1.23.):

$$J_{o_n} := |O_n| \cdot |x_n| \quad (25)$$

$$S_{Jo} := \sum_{n=44945}^{64948} (J_{o_n}) \quad S_{jo} := \frac{S_{Jo}}{64948 - 44945} \quad S_{jo} = 0.014$$



Att. 4.1.23. Iegūtās jaudas grafiks laikā.

Lietderības koeficients:

$$\eta := \frac{S_{jo}}{S_{ji}} \cdot 100 \quad \eta = 0.101$$

Iegūtais rezultāts, lai arī pozitīvs, tomēr ir ļoti niecīgs. Iemesli šādam iznākamam var būt dažādi. Šajā nodaļā apskatītais modelis 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 izlīdzinās bez rezultējoša vilces spēka. Tādējādi iegūt pozitīvu pārvietojumu ir iespējams, taču rezultāts ir neapmierinošs. Galvenais iemesls ir - reālas zivs korpus un aste ir elastīgi un to telpiskā forma ir konuss. Šāds modelis netiek apskatīts, tāpēc mēģināsim uzlabot esošo. Pirmkārt, nepieciešams sistēmu optimizēt izvēloties efektīvākus parametrus.

4.2. Peldoša objekta modelis ar harmonisku ierosmi un parametru optimizāciju

Optimizējam sistēmu ievēdot mainīgo parametru kā parādīts (10).

Pirms optimizācijas jāizvēlas parametri, kurus optimizēt. Šajā gadījumā nemainīsim sistēmas fiziskos parametrus, turpretī pētīsim atsperes stinguma koeficienta un harmoniskās ierosmes frekvences ietekmi uz sistēmas darbību. Izvēlētie parametri parādīti tabulā 3.3.1.:

Tab. 4.2.1. Optimizējamo parametru saraksts

Optimizācijas parametrs	Nozīme	Vērtība pirms optimizācijas	Optimizācijas parametra apakšējā robeža	Optimizācijas parametra augšējā robeža
c	Atsperes stingums	20	5	200
k	Ierosmes momenta frekvence	$4\pi/2$	$\pi/2$	$10\pi/2$

Izveidojam Mathcad modeli ar ierosmes momenta mainīgu vērtību:

$$\begin{aligned}
 L &:= 0.1 & m &:= 1 & J_0 &:= m \left(\frac{L}{2}\right)^2 \\
 M_0 &:= 20 & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & B &:= 0.01 & b &:= 5 & c_n &:= 20 \\
 n &:= 0..7000 & s_n &:= 0.001 & t_n &:= n \cdot s & ds &:= 5 & db &:= 200 & M_c &:= \frac{db - ds}{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_n \\ c_n \\ \omega_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ ds \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ c_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ ds + n \cdot s \cdot M_c \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c_n \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

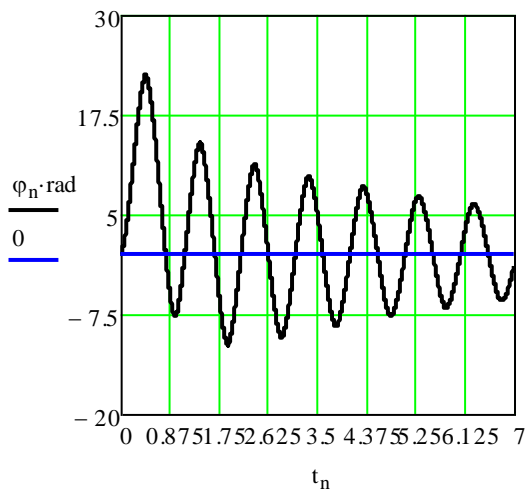
kur:

$$f(c) = K1 + \frac{K2 \cdot c}{f(t)}, \quad (24)$$

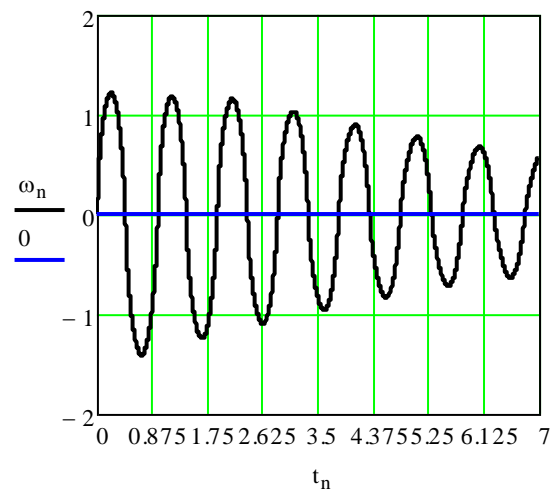
ds – diapazona sākums;

db – diapazona beigas.

Iegūstam astes kustības grafikus (att. 4.2.1., 4.2.2., 4.2.3.):

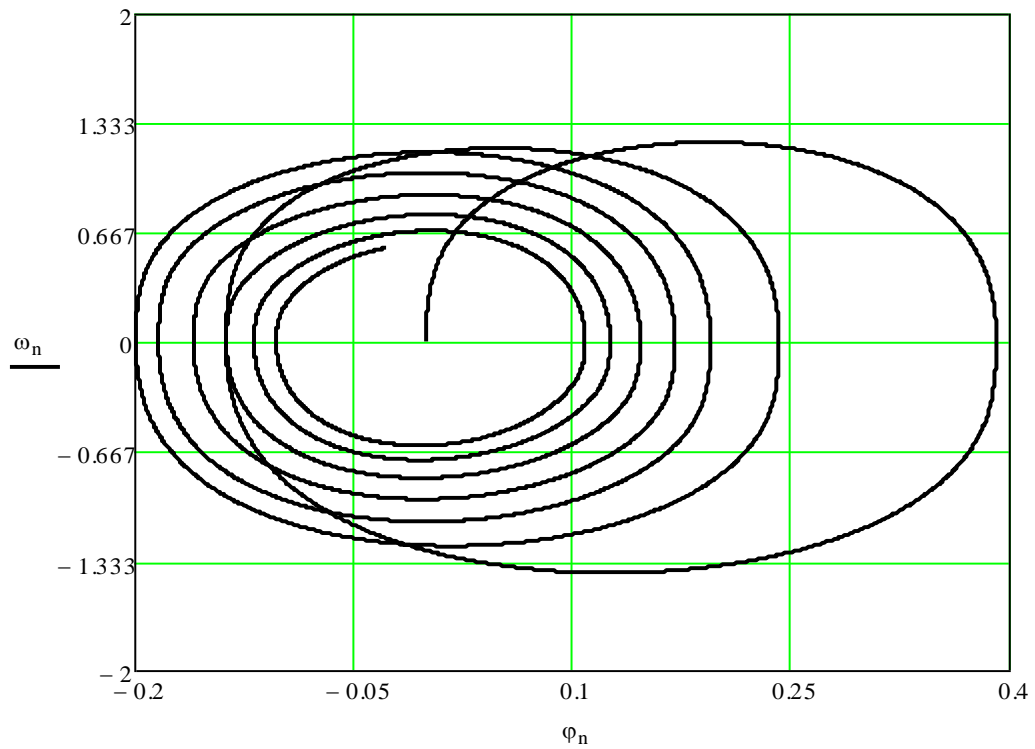


Att. 4.2.1. astes pagriezienu leņķis

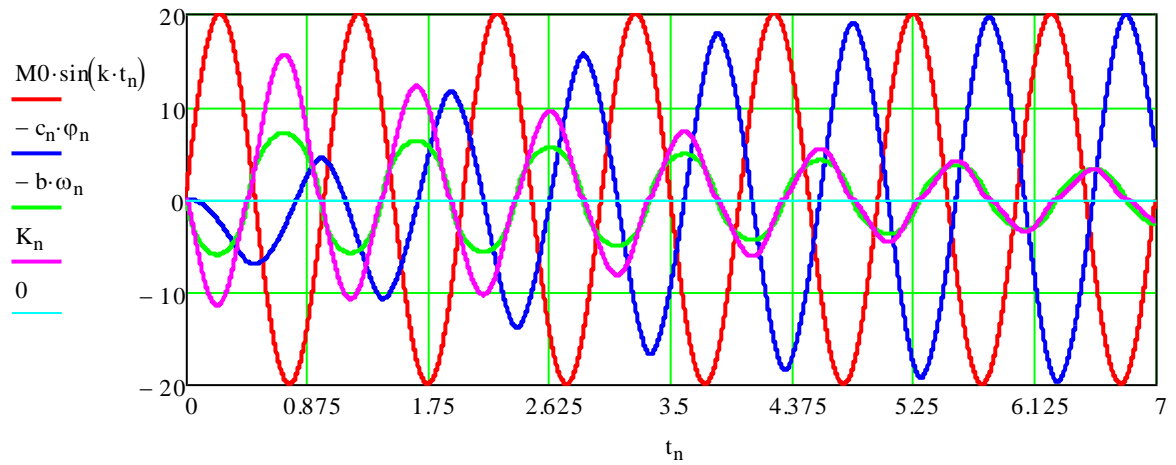


Att. 4.2.2. astes pagriezienu leņķiskais ātrums

Kā redzams iegūtajos kustības grafikos, astes kustības amplitūda laikā samazinās, kas skaidrojams ar atsperes stinguma pieaugumu. Astes kustība tāpat kā iepriekš sākas no „0” stāvokļa (tādi sākuma nosacījumi), taču stacionāru režīmu neatrod. Pie mainīga parametra tas ir normāli. Aplūkojot ūdens pretestības radīto spēku, atsperes radīto spēku, demfera radīto spēku un pielikto harmonisko momenta spēku vienā grafikā varam pārliecināties, ka harmoniskais vadības momenta radītais spēks joprojām diametrāli pretēji mainās ar pārējiem spēkiem, kuri tam pretojas, kā tam arī vajadzētu būt (att. 4.2.4.). Redzams, ka atsperes spēks lēnām sasniedz pieliktā momenta vērtības, taču demfera un ūdens pretestības spēki zaudē savu īpatsvaru.

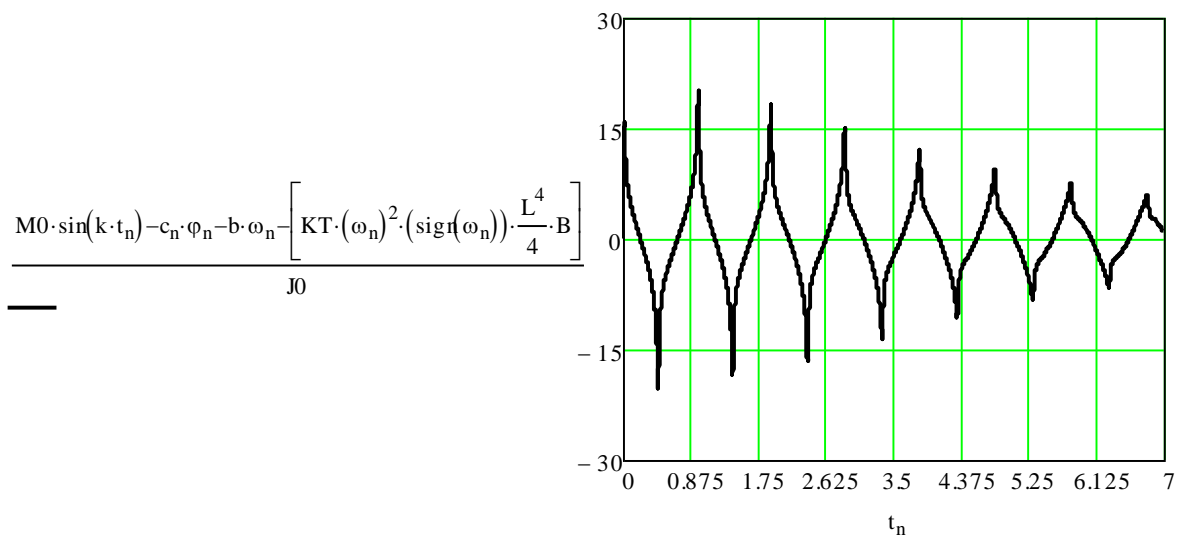


Att. 4.2.3. astes kustība fāzu plaknē.

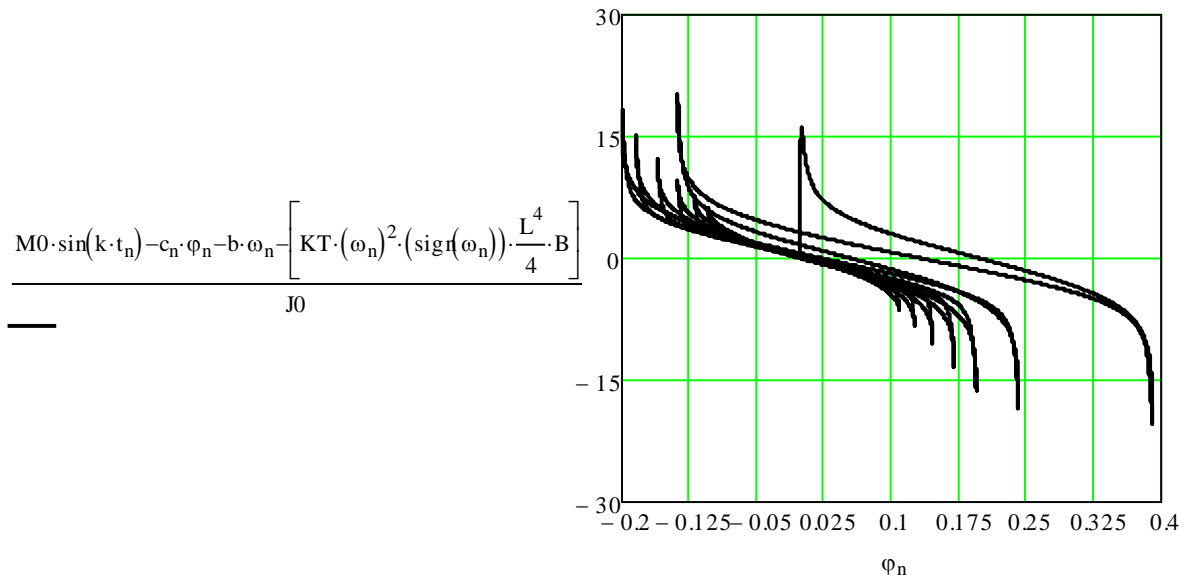


Att. 4.2.4. Uz asti darbojošies spēki laikā.

Astes paātrinājumi laikā un pārvietojuma fāzu plaknē grafiski attēloti attēlos 4.2.5. un 4.2.6.



Att. 4.2.5. Astes pātrinājums laikā.

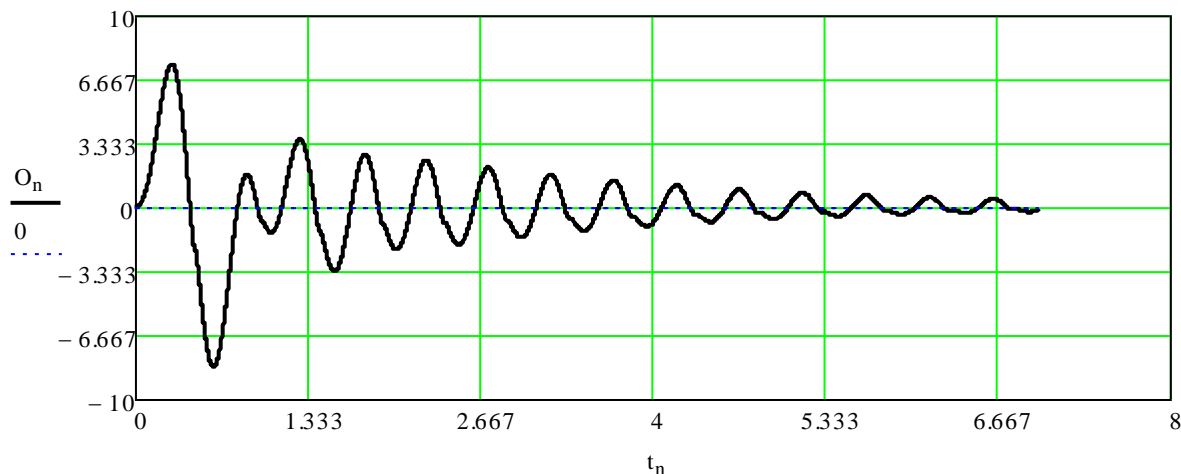


Att. 4.2.6. Astes pātrinājums pārvietojuma plaknē.

Kā iepriekš, no (18) iegūstam astes reakciju pret peldošā objekta korpusu. Šoreiz ar mainīgu parametru:

$$O_n := m \cdot \left[\left(\omega_n \right)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi_n) + \left[\frac{\left(M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c_n \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n \right) + K_n \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right)}{J_0} \dots \right] \right. \\ \left. + KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^3}{3} \cdot B \cdot \sin(\varphi_n) \right] \quad (25)$$

Iegūstam astes reakcijas grafisko izpildījumu (att. 4.2.7.):



Att. 4.2.7. Astes reakcija laikā.

No grafika redzams, ka reakcija laikā mazinās. Stabils kustības režīms tā arī netiek iegūts. Varam sagaidīt efektivitātes pasliktināšanos pie lielām c_n vērtībām.

Iepriekš izmantoto metodoloģiju ar soļu diapazonu ar veseliem periodiem, kurā kustība jau ir nostabilizējusies, izmantot nevaram, jo kustība nenostabilizējas. Izmantosim jaudas attiecību visā diapazonā, kura vairs nebūs konstante (26). Tad diapazonā var meklēt efektīvākos periodus un pētīt tuvāk.

$$f(\eta) = \frac{\eta_{ieg.}(t)}{\eta_{ievad.}(t)}, \tag{26}$$

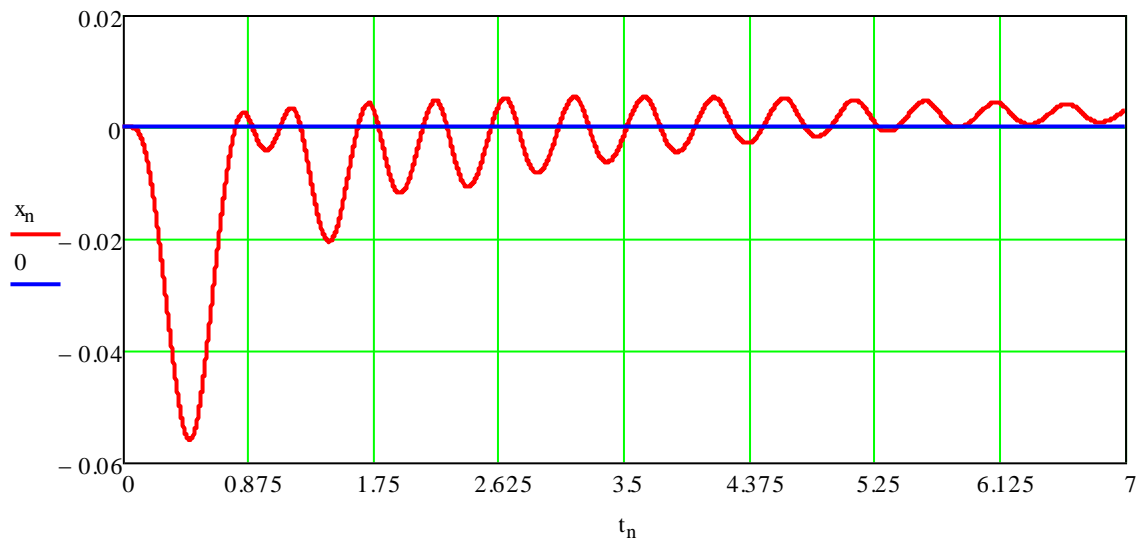
Modelējam peldošu objektu kā (24):

$$\begin{aligned} A &:= 0.0300 & \rho_0 &:= 100 & L_k &:= 1 & m_1 &:= \rho_0 A \cdot L_k \\ \rho &:= 100 & b_1 &:= 8. & b_2 &:= -1 & b_3 &:= 0.00 & C &:= 1 \\ n &:= 0..700 & s &:= 0.00 \end{aligned}$$

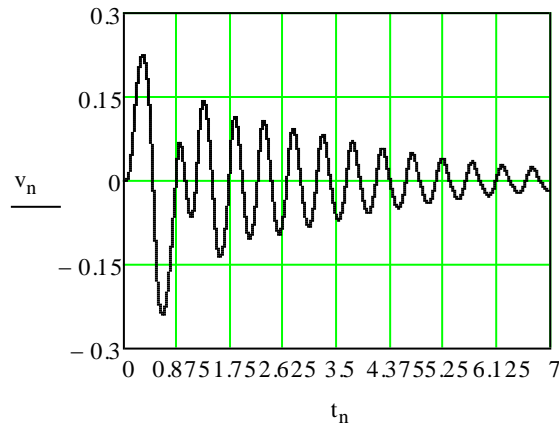
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} x_n + s \cdot v_n \\ v_n + \frac{s}{m_1} \cdot \left[-O_n - b_1 \cdot v_n - b_2 \cdot v_n \cdot |v_n| - b_3 \cdot (v_n)^3 - C \cdot (\sqrt{A} \cdot L_k \cdot 4 + B \cdot 2) \cdot \frac{\rho \cdot v_n \cdot |v_n|}{2} \right] \end{bmatrix}$$

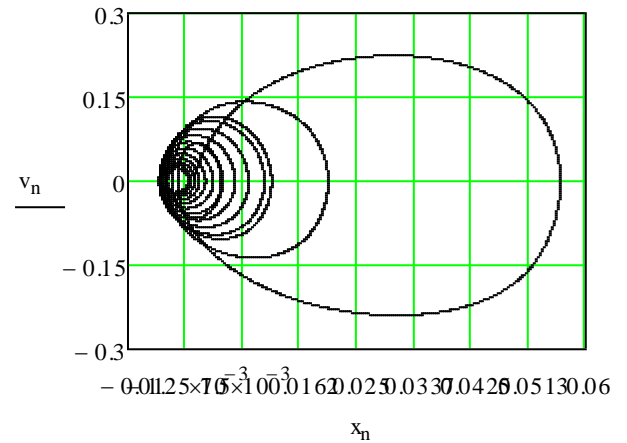
Iegūstam grafiski objekta pārvietojuma grafiku laikā (att. 4.2.8.), ātruma grafiku laikā (att. 4.2.9.) un kustību pārvietojuma fāzu plaknē (att. 4.2.10.):



Att. 4.2.8. Objekta pārvietojums laikā.

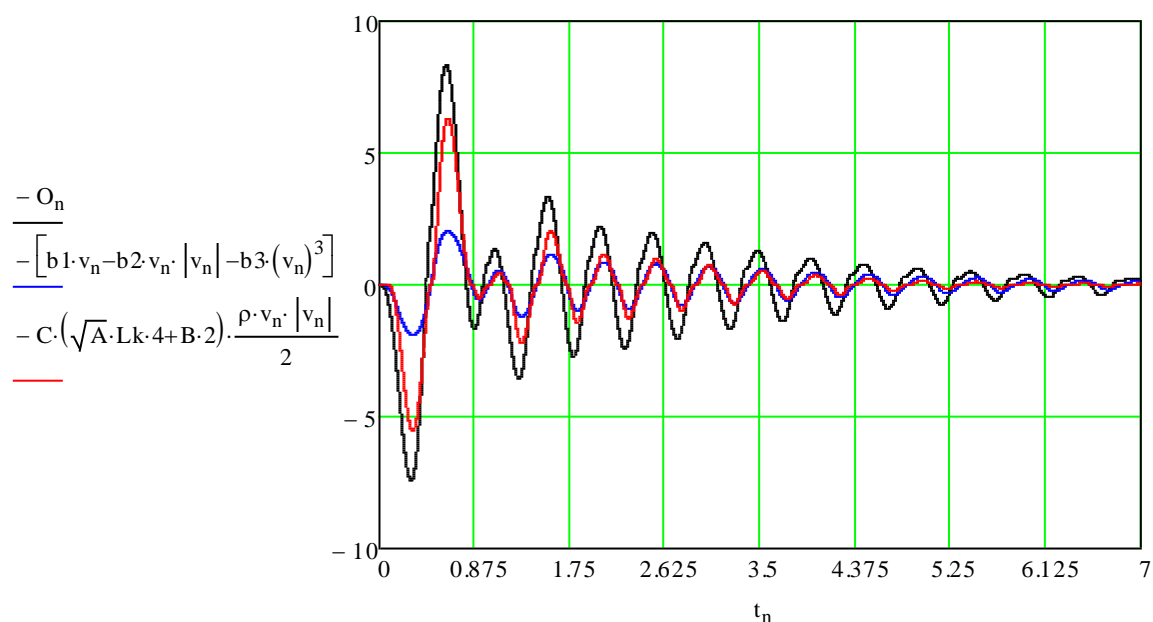


Att. 4.2.9. Objekta ātrums laikā.



Att. 4.2.10. Objekta kustība fāzu plaknē.

Kā redzams, samazinoties astes reakcijai laikā, samazinās arī tās dzītā objekta pārvietojums un ātrums. Visu spēku disipācija labi redzama attēlā 4.2.11.

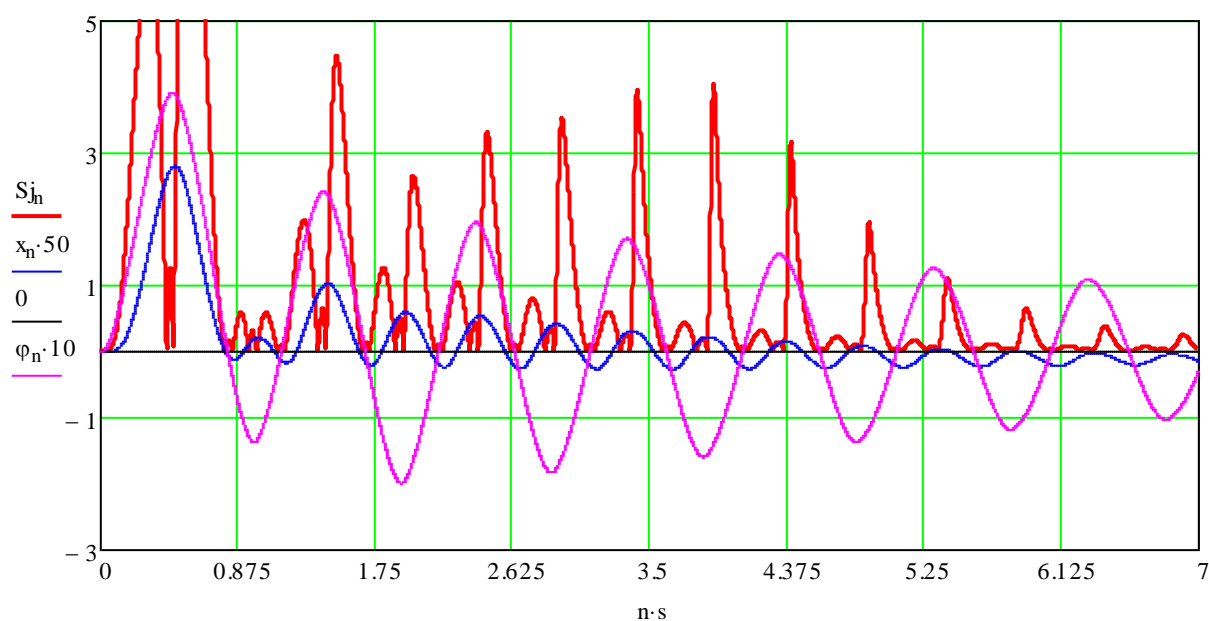


Att. 4.2.11. Uz objektu darbojošies spēki.

No (24, 25, 26) iegūstam:

$$S_{j_n} := \frac{|O_n| \cdot |v_n|}{|M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n)| \cdot |\omega_n|} \cdot 100 \quad (27)$$

Modelējam un iegūstam grafiski (att. 4.2.12.). Uzskatāmības labad grafikā norādīts arī objekta pārvietojums laikā, astes pagriezienu leņķis laikā, kā arī „nulles” līnija.



Att. 4.2.12. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

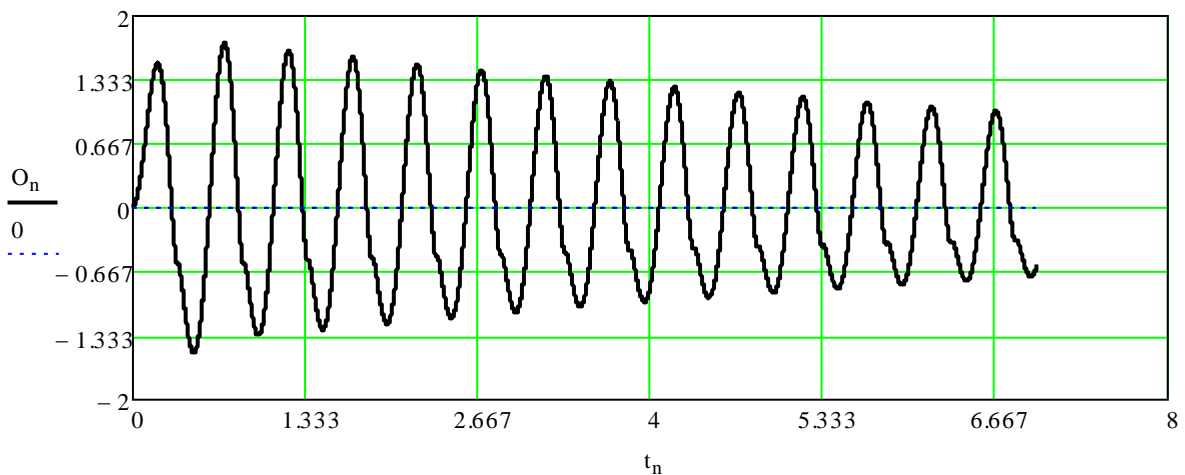
Maksimumus, kuri rodas pirmā perioda laikā, ņemt vērā nav korekti, jo tie neatspoguļo reālo situāciju sistēmas stabilizēšanās laikā. Spriežot pēc astes reakcijas grafika (att. 4.2.7.), daudz maz tendencioza (nehaotiska) darbība iestājas ap trešo periodu. Sistēmas efektivitātes grafikā varam novērot efektivitātes maksimumu pakāpenisku pieaugumu līdz ceturtā perioda beigām, un kritienu pēcāk. Varam secināt, ka efektīvākā atsperes darbība ir laika diapazonā no 3 – 4.5 s no simulācijas sākuma, kas dod atsperes stinguma vērtības 90 – 130. Izvēlamies jaunu mainīgā parametra raksturlīkni ar mums interesējošo parametra diapazonu:

$$\begin{aligned}
 L_n &:= 0.1 & m &:= 1 & J_0 &:= m \left(\frac{L}{2}\right)^2 \\
 M_0 &:= 20 & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & B &:= 0.01 & b &:= 5 & c_n &:= 20 \\
 n &:= 0..700 & s_n &:= 0.00 & t_n &:= n \cdot s & ds &:= 90 & db &:= 130 & Mc &:= \frac{db - ds}{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_n \\ c_n \\ \omega_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ ds \\ 0 \end{pmatrix}$$

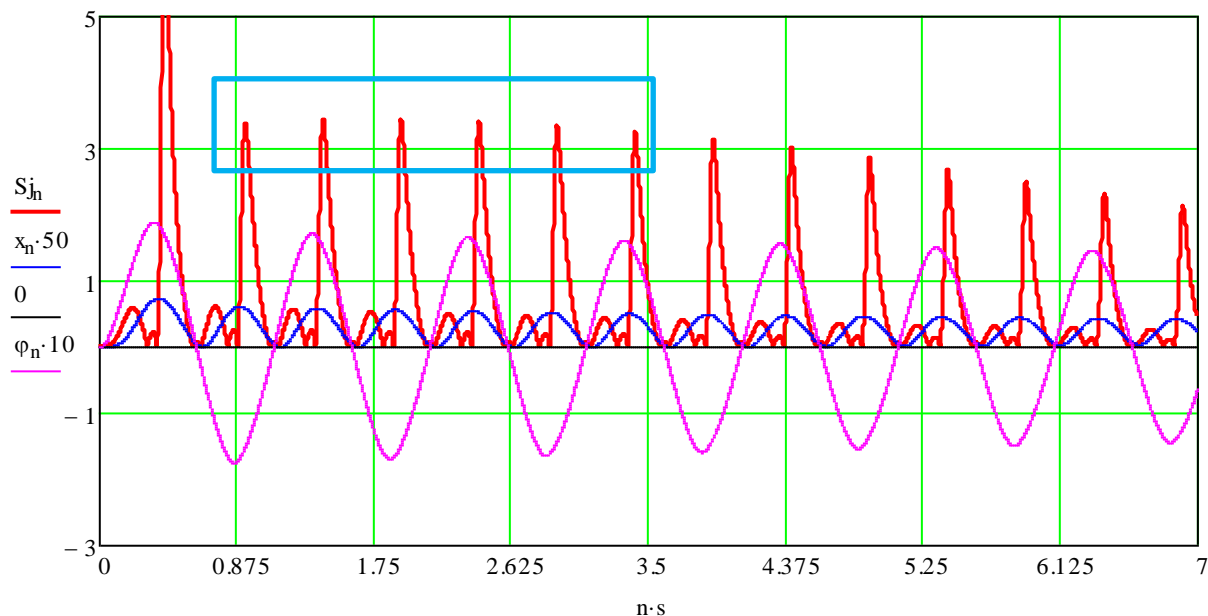
$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ c_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ ds + n \cdot s \cdot Mc \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c_n \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

Iegūstam daudz mierīgāku sistēmas darbību ar mazāku astes reakcijas amplitūdas kritumu (att. 4.2.13.) kā iepriekš:



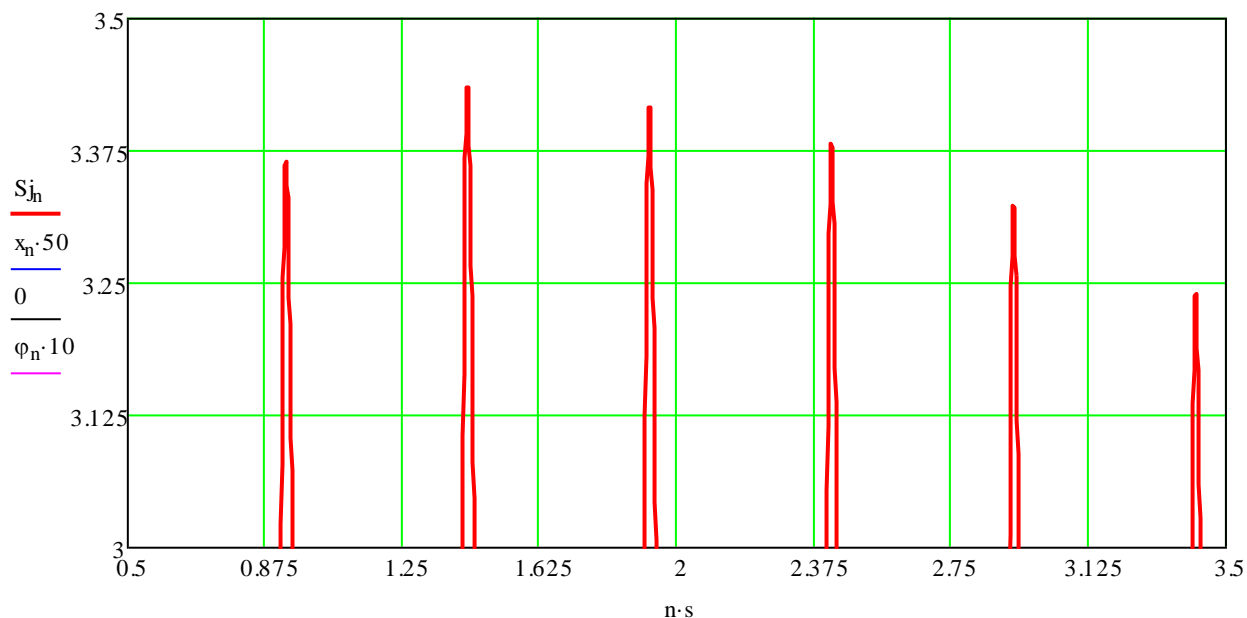
Att. 4.2.13. Astes reakcija laikā.

Iegūstam sistēmas efektivitātes grafiku (att. 4.2.14.):



Att. 4.2.14. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Kā redzams, efektivitātes maksimumi koncentrējušies simulācijas laikā starp 0.8 un 3.5 sekundi. Apskatām tuvāk (att. 4.2.15.):



Att. 3.3.15. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Visaugstāko efektivitātes vērtību sistēma sasniedz otrajā simulācijas sekundē, kurā c_n vērtība lineāri pieauga no 95.4 – 101.4. Šādi ar secīgiem soļiem var samazināt mainīgā parametra diapazonu līdz tādām apjomam, kad to jau var uztvert par konstanti. Dotā gadījumā efektīvākā sistēmas darbība izrādījās pie atsperes stinguma koeficienta $c_n = 96$.

Aprēķinām vidējo sistēmas efektivitāti:

$$\eta := \frac{S_{jo}}{S_{ji}} \cdot 100 \quad \eta = 0.566$$

Iegūtais optimizētas sistēmas efektivitātes rezultāts 0.566% ievērojami pārsniedz neoptimizētas sistēmas rezultātu.

Optimizējam otru izvēlēto sistēmas parametru – frekvenci. Sastādām matemātisko modeli,

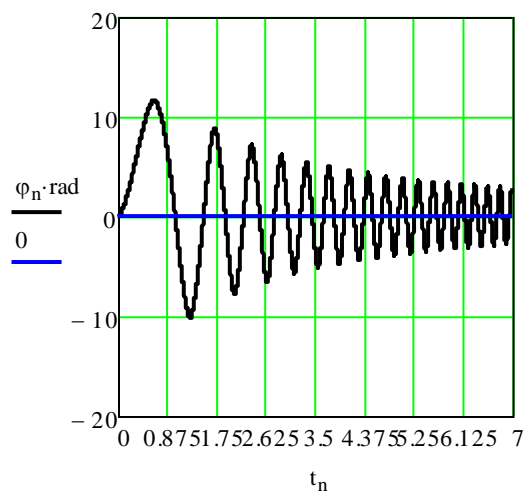
$$\begin{aligned} M0 &:= 2C & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & B &:= 0.0 & b &:= 5 & c &:= 9 \\ n &:= 0..700 & s_{aa} &:= 0.00 & t_n &:= n \cdot s & ds &:= \frac{\pi}{2} & db &:= 10 \frac{\pi}{2} & Mk &:= \frac{db - ds}{7} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_n \\ k_n \\ \omega_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ ds \\ 0 \end{pmatrix}$$

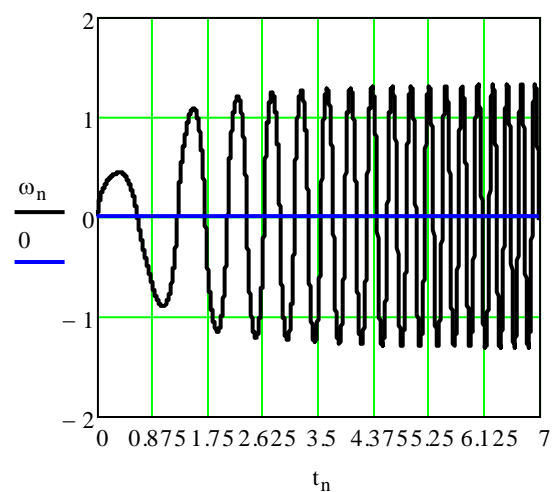
$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ k_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ ds + n \cdot s \cdot Mk \\ \omega_n + \frac{s}{J0} \cdot \left[M0 \cdot \sin(k_n \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

kurā frekvences regulēšanai izmantojam tādu pašu lineāru funkciju ar nobīdi kā (24).

Iegūstam astes kustības grafikus (att. 4.2.16., 4.2.17., 4.2.18.):

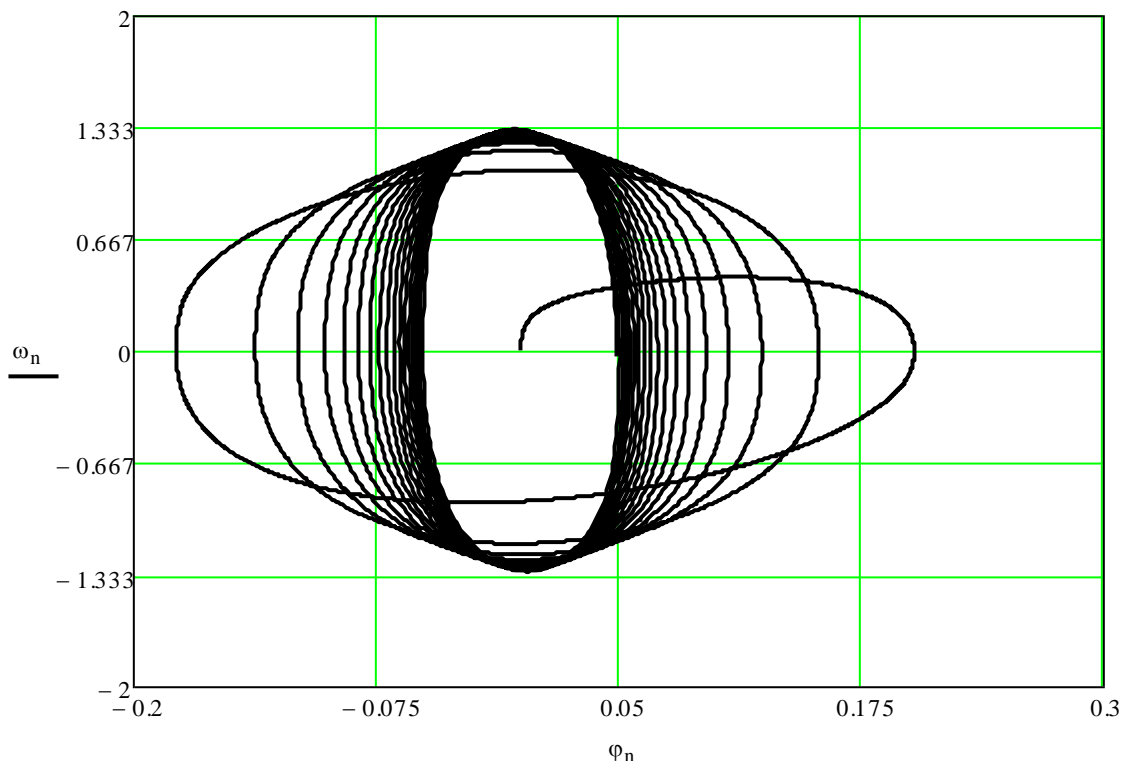


Att. 4.2.16. Astes pagrieziņa leņķis laikā



Att. 4.2.17. Astes pagrieziņa leņķiskais ātrums laikā

Kā redzams iegūtajos astes kustības grafikos, astes kustības amplitūda laikā samazinās tāpat kā iepriekšējā optimizācijas piemērā ar atsperes stingumu, tikai šoreiz tas skaidrojams ar harmoniskā spēka frekvences pieaugumu.

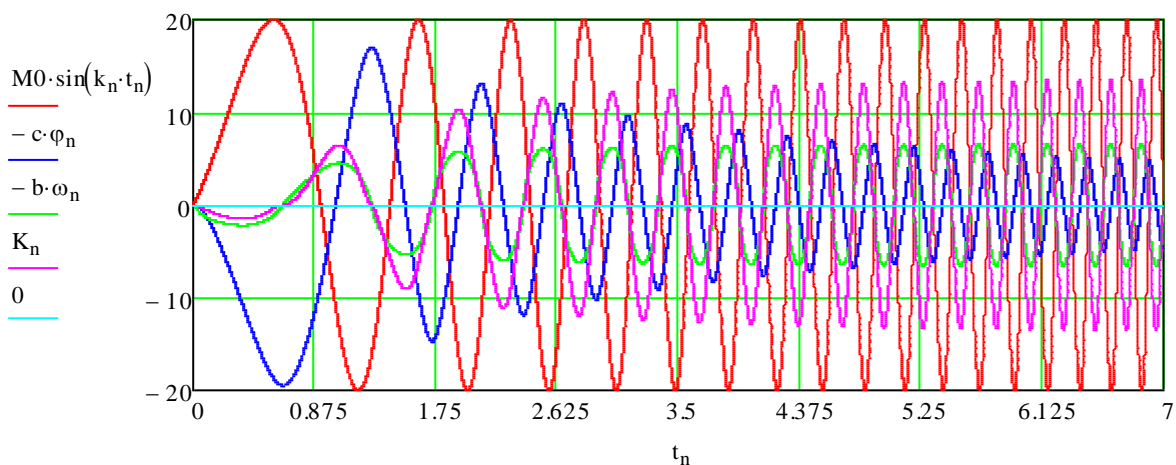


Att. 4.2.18. astes kustība fāzu plaknē.

Astes kustība fāzu plaknē tāpat kā iepriekš sākas no „0” stāvokļa (tādi sākuma nosacījumi), šķietami sasniedz stacionāru režīmu. Pie mainīga parametra tas ir neparasti, tomēr var būt skaidrojams ar to, ka frekvences pieaugums ir salīdzinoši lēns. Ļoti labi vērojama amplitūdas samazināšanās vienlaicīgi ar kustības ātruma pieaugumu.

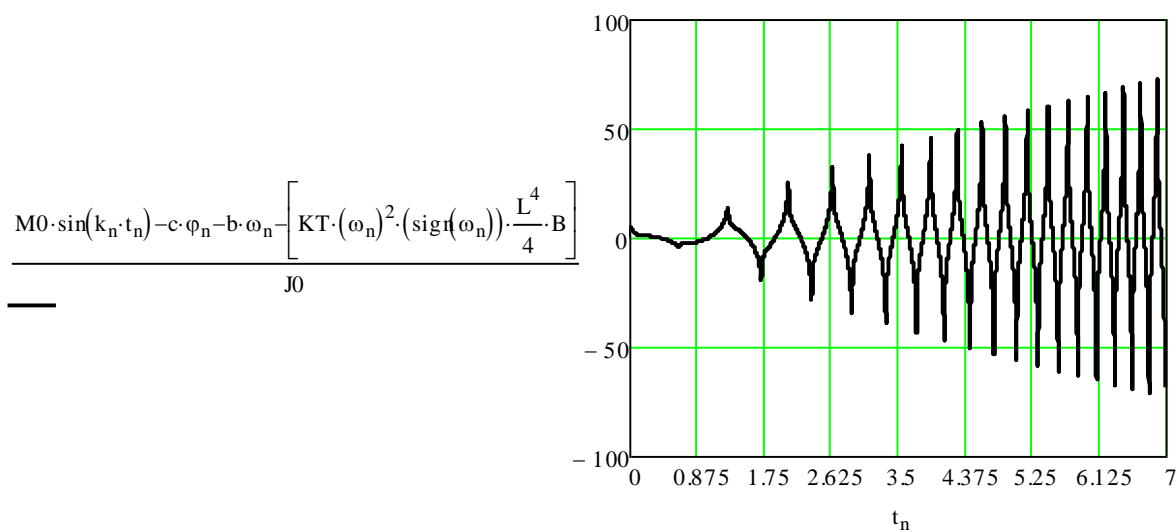
Aplūkojot ūdens pretestības radīto spēku, atsperes radīto spēku, demfera radīto spēku un pielikto harmonisko momenta spēku vienā grafikā (att. 4.2.19.) varam pārlicināties, ka harmoniskais vadības momenta radītais spēks joprojām diametrāli pretēji mainās ar pārējiem spēkiem, kuri tam pretojas, kā tam arī vajadzētu būt. Šajā eksperimentā līdz ar frekvences pieaugumu visuzskatāmāk pieaug apkārtējās vides pretestības spēki, ko var skaidrot ar frekvences pieaugumu. Tas, kā jau minēts, izraisa astes leņķiskā kustības ātruma pieaugumu, kas savukārt noved pie apkārtējās vides pretestības spēku nelineārās (dotā gadījumā – kvadrātiskās) dabas. Tas pats attiecas uz demferēšanas spēkiem, tomēr tie uzskatāmi

nemainās. Šeit ātruma pieaugumu kompensē amplitūdas samazinājums. Atsperes spēki laikā samazinās, jo samazinās astes kustības amplitūda.

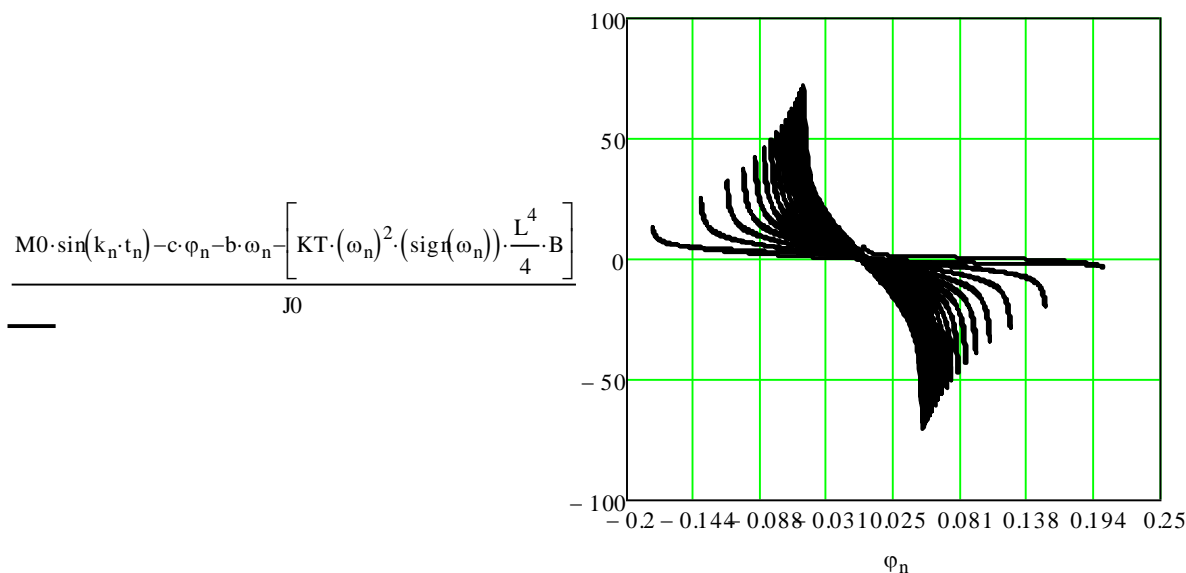


Att. 4.2.19. Uz asti darbojošies spēki laikā.

Astes pātrinājumi laikā un pārvietojuma fāzu plaknē grafiski attēloti attēlos 4.2.20. un 4.2.21. Pātrinājums krasi pieaug saistībā ar augošo kustības frekvenci un amplitūdas samazinājumu.



Att. 4.2.20. Astes pātrinājums laikā.

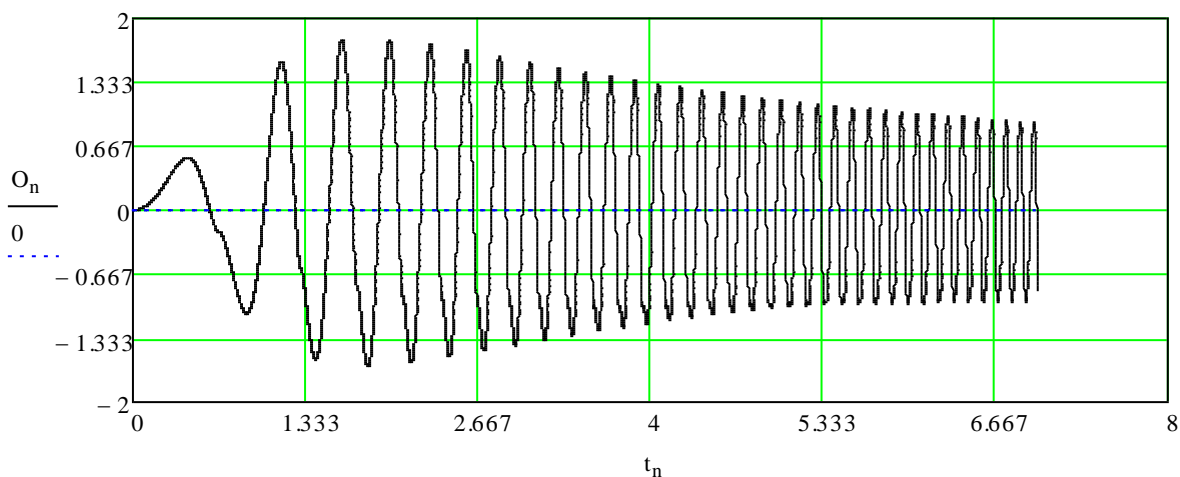


Att. 4.2.21. Astes pātrinājums laikā.

Kā iepriekš, no (18) iegūstam astes reakciju pret peldošā objekta korpusu. Arī šoreiz ar mainīgu parametru – frekvenci:

$$O_n := m \cdot \left[(\omega_n)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi_n) + \frac{(M_0 \cdot \sin(k_n \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n) + K_n \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right) \dots}{J_0} + KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^3}{3} \cdot B \cdot \sin(\varphi_n) \right]$$

Iegūstam astes reakcijas grafisko izpildījumu (att. 4.2.22.):



Att. 4.2.22. Astes reakcija laikā.

No grafika redzams, ka reakcija laikā mazinās. Stabils kustības režīms tā arī netiek iegūts, lai gan samazinājums laikā mazinās. Atkal varam sagaidīt efektivitātes pasliktināšanos pie lielām k_n vērtībām.

Tā pat kā iepriekš, izmantoto metodoloģiju ar soļu diapazonu ar veseliem periodiem, kurā kustība jau ir nostabilizējusies, izmantot nevaram, jo kustība nenostabilizējas.

Izmantosim to pašu jaudas attiecību visā diapazonā (26). Tad diapazonā var meklēt efektīvākos periodus un pētīt tuvāk.

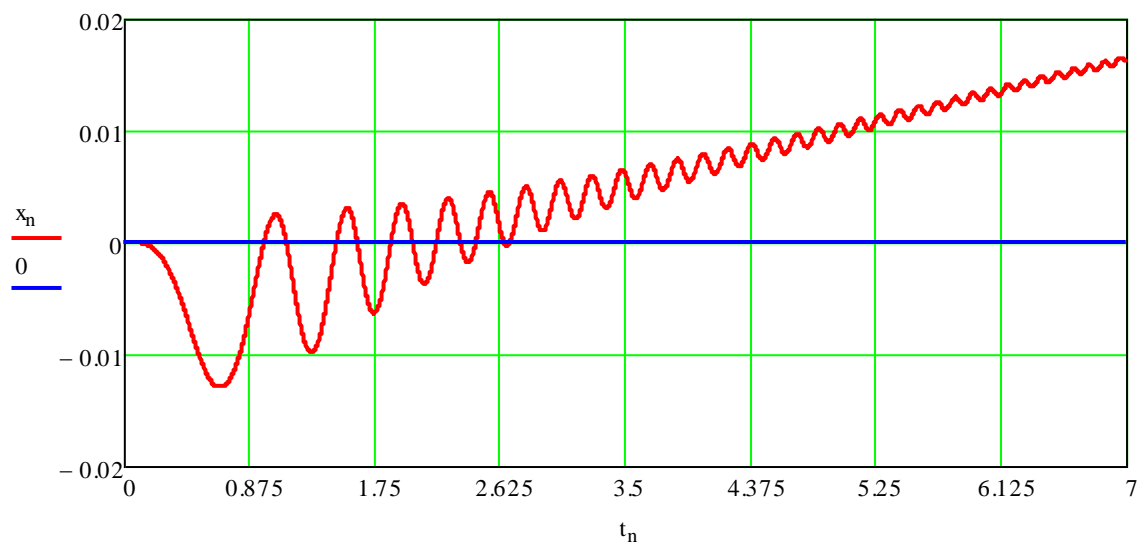
Modelējam peldošu objektu kā (24):

$$\begin{aligned} A_{\text{max}} &:= 0.0300 & \rho_0 &:= 100 & L_k &:= 1 & m_1 &:= \rho_0 A \cdot L_k \\ \rho &:= 100 & b_1 &:= 8.5 & b_2 &:= -1 & b_3 &:= 0.00 & C &:= 1 \\ n &:= 0..700 & s_{\text{max}} &:= 0.00 \end{aligned}$$

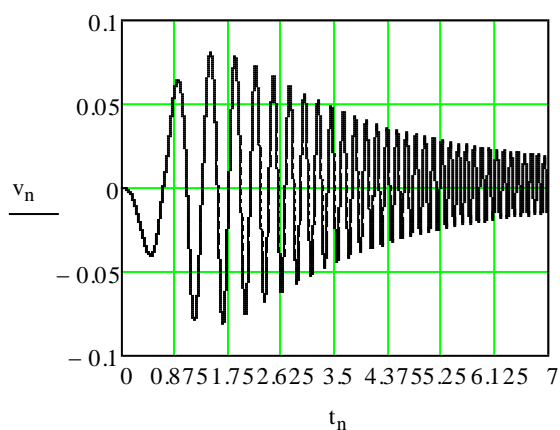
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} x_n + s \cdot v_n \\ v_n + \frac{s}{m_1} \cdot \left[-O_n - b_1 \cdot v_n - b_2 \cdot v_n \cdot |v_n| - b_3 \cdot (v_n)^3 - C \cdot (\sqrt{A} \cdot L_k \cdot 4 + B \cdot 2) \cdot \frac{\rho \cdot v_n \cdot |v_n|}{2} \right] \end{bmatrix}$$

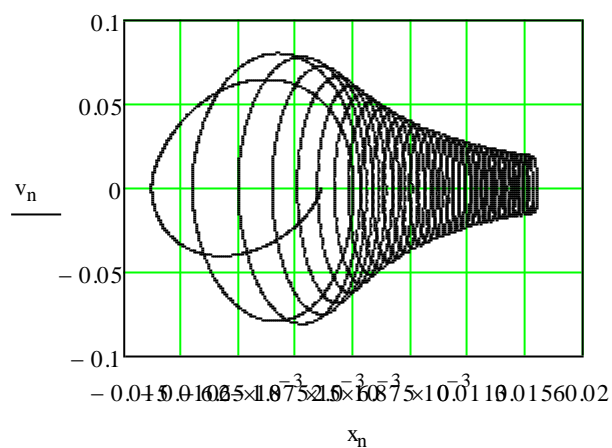
Iegūstam grafiski objekta pārvietojuma grafiku laikā (att. 4.2.23.), ātruma grafiku laikā (att. 4.2.24.) un kustību pārvietojuma fāzu plaknē (att. 4.2.25.):



Att. 4.2.23. Objekta pārvietojums laikā.

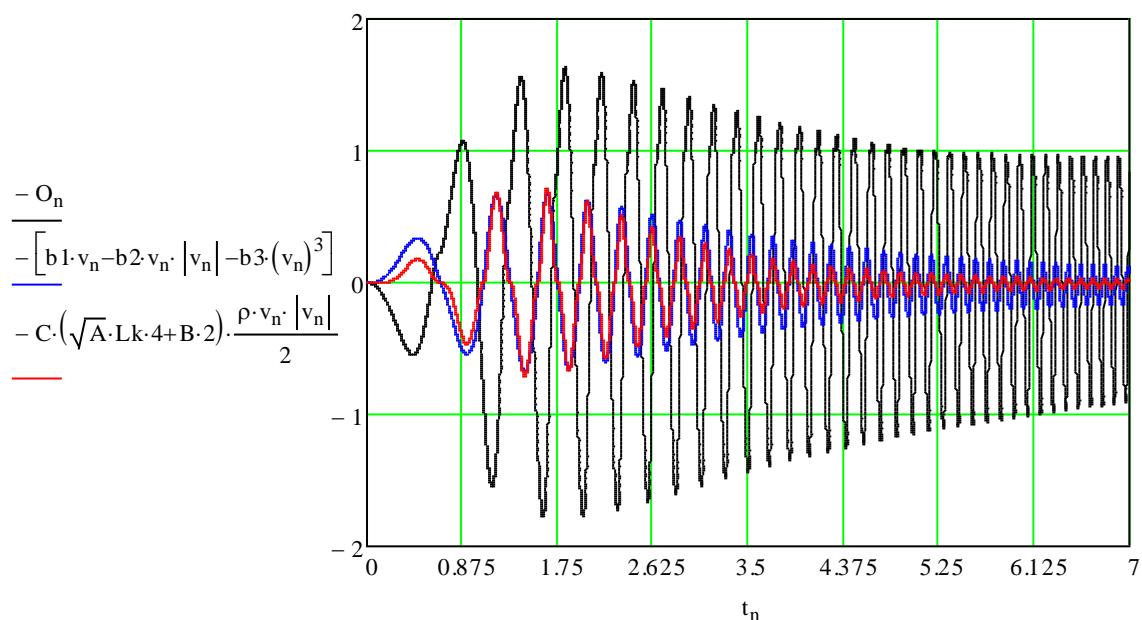


Att. 4.2.24. Objekta ātrums laikā.



Att. 4.2.25. Objekta kustība fāzu plaknē.

Kā redzams, samazinoties astes reakcijai laikā, samazinās arī tās dzītā objekta ātrums, bet pārvietojums saglabājas diezgan lineārs. Visu spēku disipācija labi redzama attēlā 4.2.26.

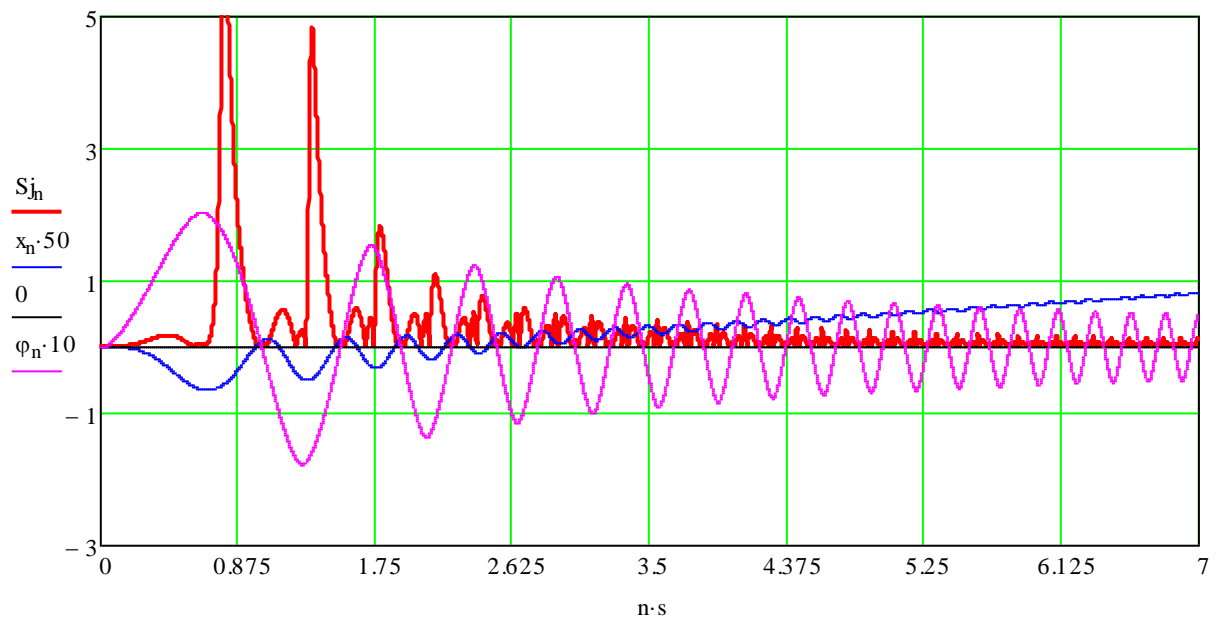


Att. 4.2.26. Uz objektu darbojošies spēki.

No (27) iegūstam:

$$S_j^n := \frac{|O_n| \cdot |v_n|}{|M \cdot \sin(k_n \cdot t_n)| \cdot |\omega_n|} \cdot 100$$

Modelējam un iegūstam grafiski (att. 4.2.27.). Uzskatāmības labad grafikā norādīts arī objekta pārvietojums laikā, astes pagrieziena leņķis laikā, kā arī „nulles” līnija.



Att. 4.2.27. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

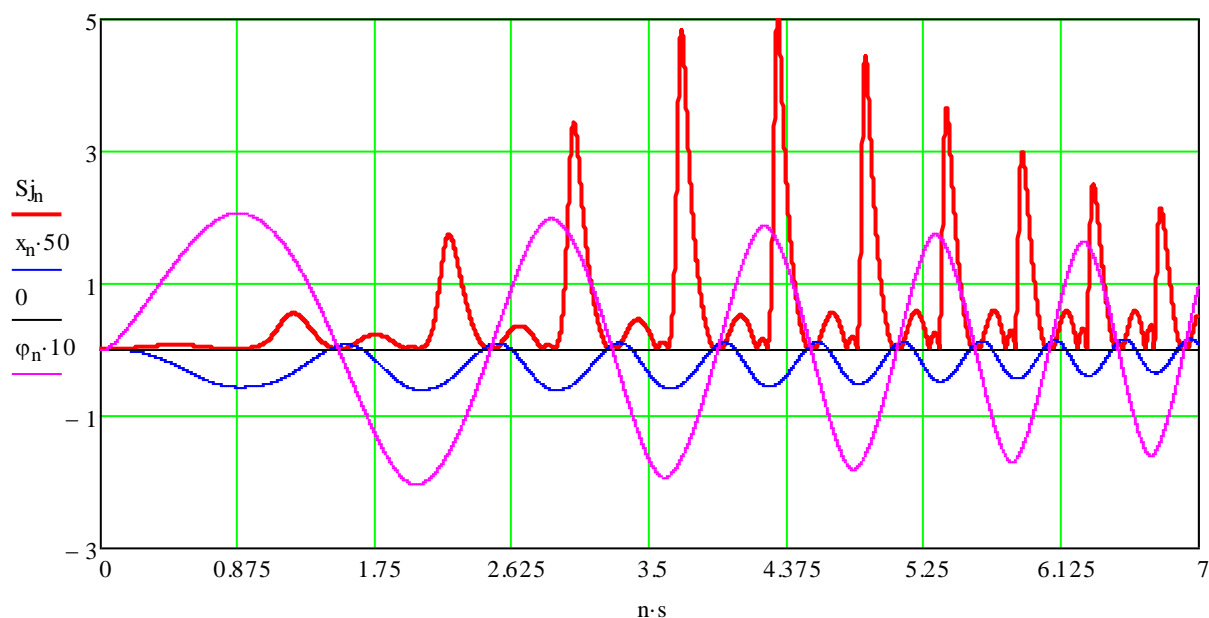
Redzams, ka laikā sistēmas efektivitāte strauji krīt. Samazinām mainīgā parametra augšējo robežu ds no 10 uz 3:

$$\begin{aligned}
 L_{\text{max}} &:= 0.1 & m &:= 1 & J_0 &:= m \left(\frac{L}{2}\right)^2 \\
 M_0 &:= 2C & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & B &:= 0.01 & b &:= 5 & c_{\text{max}} &:= 9\epsilon \\
 n &:= 0..7000 & s_{\text{max}} &:= 0.001 & t_n &:= n \cdot s & ds &:= \frac{\pi}{2} & db &:= 3 \cdot \frac{\pi}{2} & Mk &:= \frac{db - ds}{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_n \\ k_{\text{max}} \\ \omega_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ ds \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ k_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ ds + n \cdot s \cdot Mk \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M_0 \cdot \sin(k_n \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

Iegūstam jaunu efektivitātes grafiku (att. 4.2.28.):



Att. 4.2.28. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

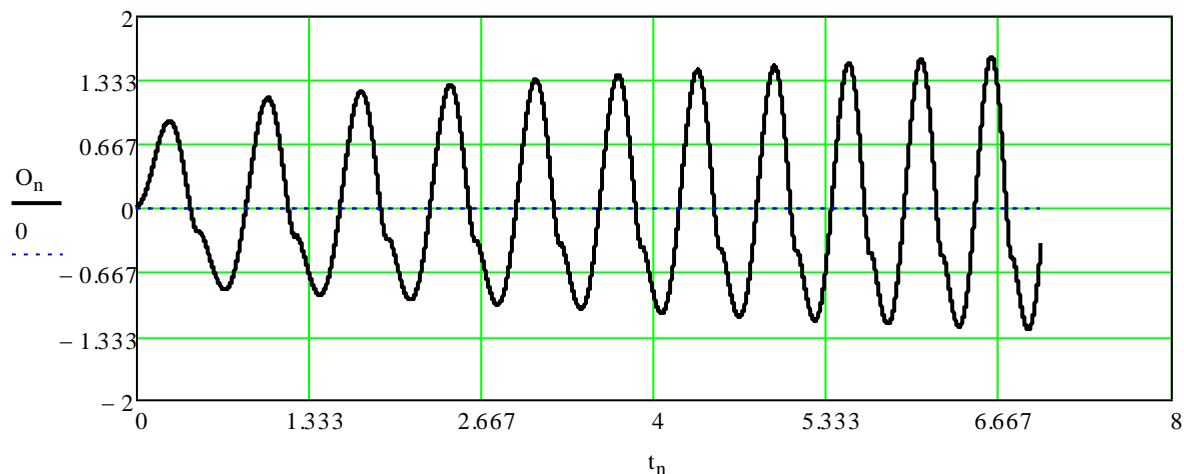
Šajā grafikā labi redzams, ka efektīvākais sistēmas darbs atrodams laika sprīdī starp 3.5 – 5 sekundēm. Sistēmas stabilizācijas laikā nekorekti maksimumi kā iepriekš nav novērojami. Spriežot pēc astes reakcijas grafika (att. 4.2.22.), tendencioza (nehaotiska) darbība iestājas starp trešo un ceturto periodu. Sistēmas efektivitātes grafikā varam novērot efektivitātes maksimumu pakāpenisku pieaugumu līdz trešajam periodam, un kritienu pēcāk. Varam secināt, ka efektīvākā darba frekvence ir laika diapazonā no 3.5 – 4.5 s no simulācijas sākuma, kas dod frekvenču diapazonu 4 – 4.5. Izvēlamies jaunu mainīgā parametra raksturlīkni ar mums interesējošo parametra diapazonu:

$$\begin{aligned}
 L_{\text{max}} &:= 0.1 & m &:= 1 & J_0 &:= m \left(\frac{L}{2}\right)^2 \\
 M_0 &:= 2C & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & B &:= 0.01 & b &:= 5 & c_{\text{max}} &:= 9\epsilon \\
 n &:= 0..7000 & s_{\text{max}} &:= 0.00 & t_n &:= n \cdot s & ds &:= 6.1 & db &:= 6.4 & Mk &:= \frac{db - ds}{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_n \\ k_{\text{max}} \\ \omega_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ ds \\ 0 \end{pmatrix}$$

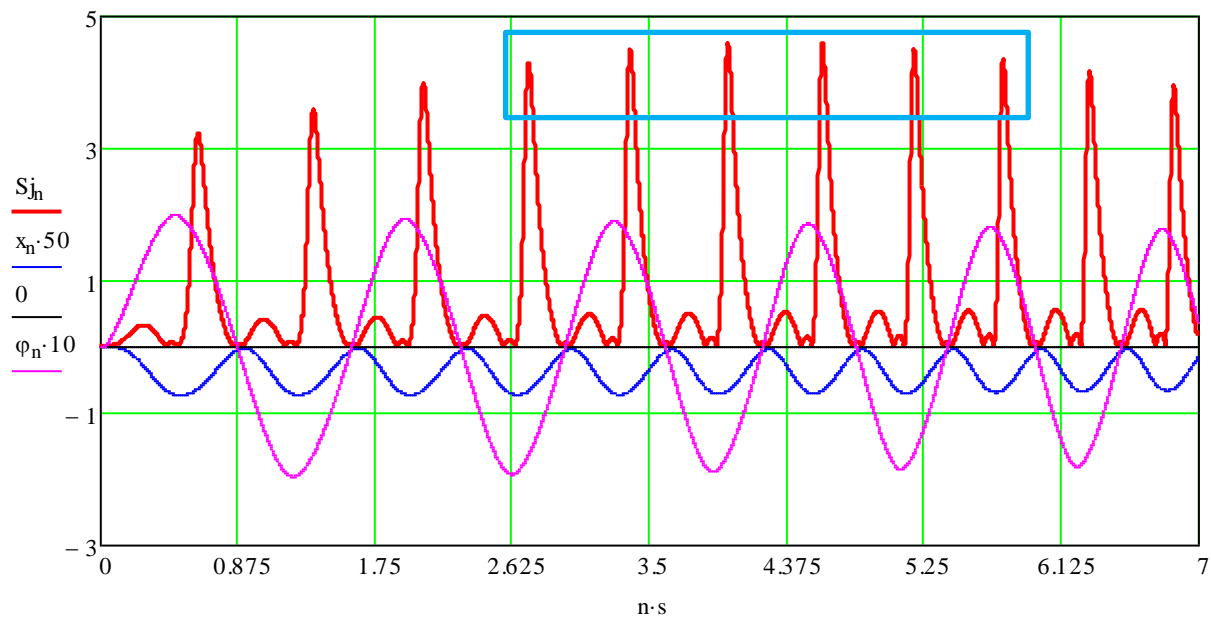
$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ k_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ ds + n \cdot s \cdot Mk \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M_0 \cdot \sin(k_n \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

Iegūstam sistēmu ar astes reakcijas amplitūdas pieaugumu (att. 4.2.29.):



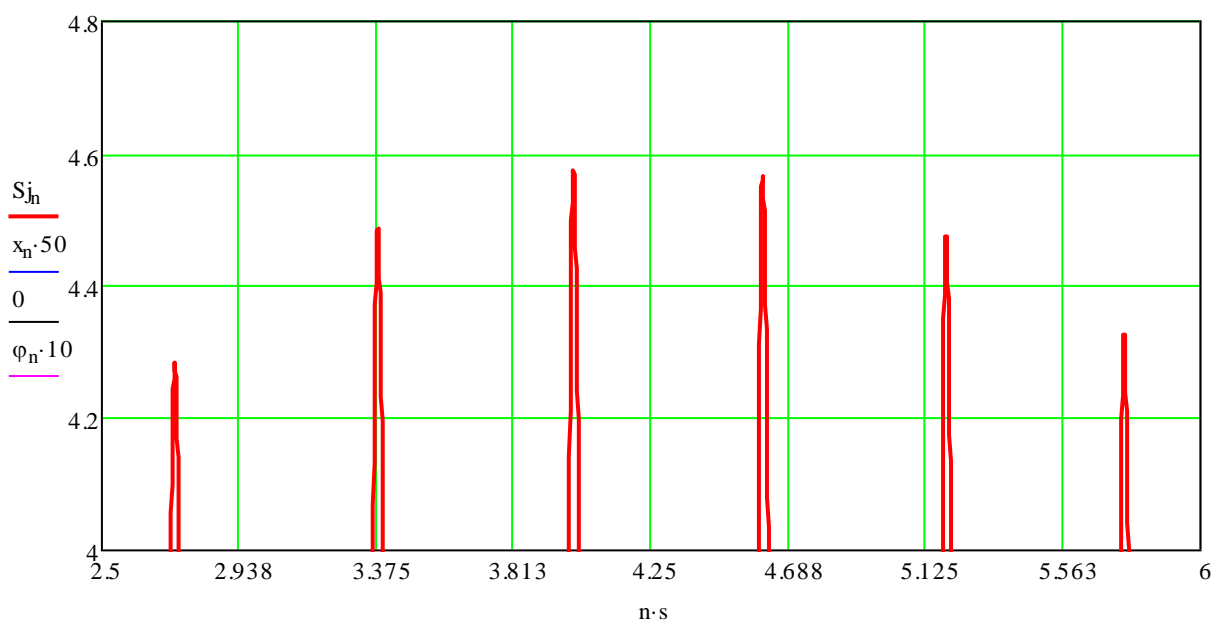
Att. 4.2.29. Astes reakcija laikā.

Iegūstam sistēmas efektivitātes grafiku (att. 4.2.30.):



Att. 4.2.30. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Kā redzams, efektivitātes maksimumi koncentrējušies simulācijas laikā starp 3. un 6. sekundi. Apskatām tuvāk (att. 4.2.31.):



Att. 4.2.31. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Visaugstāko efektivitātes vērtību sistēma sasniedz ceturtajā simulācijas sekundē, kurā k_n vērtība lineāri pieaug no 6.3 – 6.4. Šādi ar secīgiem soļiem var samazināt mainīgā parametra diapazonu līdz tādām apjomam, kad to jau var uztvert par konstanti. Dotā gadījumā efektīvākā sistēmas darbība izrādījās pie sistēmas frekvences $k_n = 6.35$.

Iegūstam efektivitāti:

$$\eta := \frac{S_{j0}}{S_{ji}} \cdot 100 \quad \eta = 0.571$$

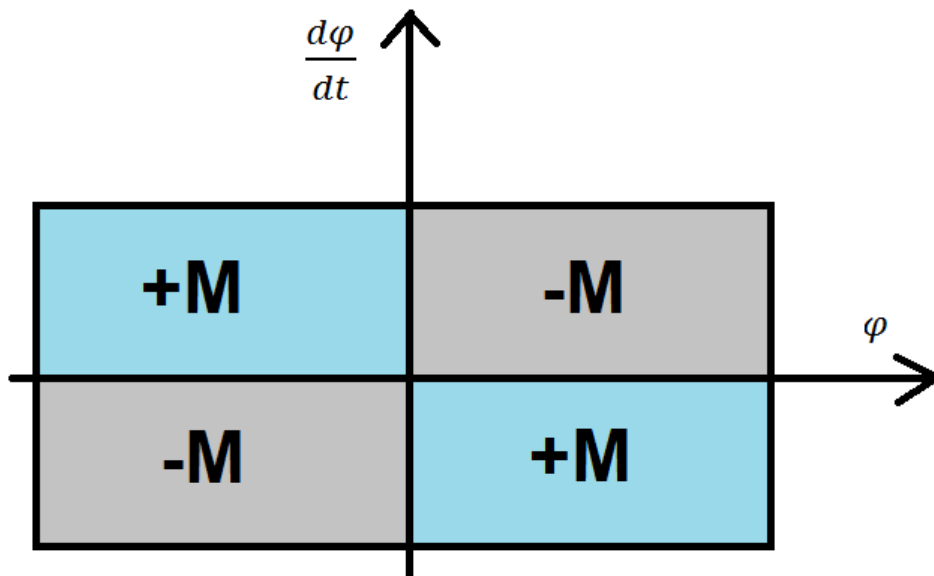
Iegūtais optimizētas sistēmas efektivitātes rezultāts 0.571% nedaudz pārsniedz iepriekšējo 0.566%, kas skaidrojams ar to, ka sākotnējā optimizējamā parametra vērtība 6.28 atradās ļoti tuvu optimizētajai parametra vērtībai – 6.35.

Līdz ar to varam spriest, ka piedāvātā optimizācijas metode darbojas un ir pielietojama līdzīgu uzdevumu risināšanai. Sasniegtie sistēmas rezultāti gan neattaisno savas cerības, jo iegūtās sistēmas efektivitātes ir ļoti zemas. Iespējams, mainot citus parametrus, ieskaitot sistēmas parametrus, ir iespējams iegūt labākus rezultātus. Tomēr cieta neelastīga aste ar harmonisku ierosmi acīmredzami nav labākais šāda propulsijas tipa risinājums. Harmoniska ierosme ir viegli realizējama tehniski (piem. kulises tipa dzineklis), taču ir ierobežota vadības ziņā, jo nesaņem atgriezeniskās saites signālus par darbības apstākļiem. Tieši tāpēc tiek piedāvāts cita veida sistēmas matemātiskais modelis ar adaptīvu ierosmi.

4.3. Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi

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 izdevīgi pielietot adaptīvu vadību kā funkciju no vienādojuma fāzu koordinātēm [22.,23] (28) (att. 4.3.1.):

$$M = f(t, \varphi, \dot{\varphi}) \quad (28)$$



Att. 4.3.1. Momenta adaptīvā vadība

Atgriezeniskās saites signāla pārvēršanai darbībā matemātiski ērti izmantot *signum* funkciju $sign(\varphi, \omega)$, kura piešķir pozitīvu vai negatīvu vērtību atkarībā no argumentu skalāro reizinājumu vērtības.

$$M(t, \varphi, \omega) = M_0 \cdot sign(\varphi, \dot{\varphi}) \quad (29)$$

Ņemot vērā (15) un augstāk minēto apgalvojumu, sastādām sistēmas matemātisko modeli:

$$J_A \cdot \ddot{\varphi} = M(t, \varphi, \dot{\varphi}) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} - k_1 \cdot B \cdot sign(\varphi : \dot{\varphi}) \cdot \int_0^L (\dot{\varphi} : \dot{\xi})^2 \cdot \xi \cdot d\xi, \quad (30)$$

kur:

J_A – astes inerces moments pret z asi caur O punktu;

$\ddot{\varphi}$ – astes leņķiskais paātrinājums;

$\int_0^L (\dot{\varphi} \cdot \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi$ - integrālis ūdens pretestības spēku noteikšanai (att. 4.1.5.);

L – astes garums;

c, b, k_l, B – konstantes.

No masas kustības teorēmas, kur astes masas centrs m svārstās ap Ox asi, iegūto (16) izmantojam arī šajā modelī.

No (30) un (16) iegūstam (31) un (32):

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t, \varphi, \dot{\varphi}) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} + (-k_1 \cdot B \cdot \text{sign}(\varphi) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^4}{4}) \right]; \quad (31)$$

$$Ox = m \cdot \left\{ \begin{aligned} & \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{J_A} \cdot \\ & \cdot \left[M(t, \varphi, \dot{\varphi}) - c \cdot \varphi - b \cdot \dot{\varphi} + (-k_1 \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi} \cdot \frac{L^4}{4}) \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi) \end{aligned} \right\} \\ + k_1 \cdot B \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^3}{3} \quad (32)$$

kur:

Ox – astes reakcija šarnīrā O x ass virzienā.

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. Saītes reakcijas spēku matemātiski var izteikt sekojoši (34), [17]:

$$K = - \int_0^T \left(\begin{aligned} & m \cdot \left\{ \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi) + \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t, \varphi, \dot{\varphi}) - c \cdot \varphi - k_l \cdot B \cdot \text{sign}(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^4}{4} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi) \right\} + \\ & + k_l \cdot B \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^3}{3} \end{aligned} \right) \cdot dt, \quad (33)$$

kur T – laika intervāls.

Korpasa pretestības spēka noteikšanai izmantojam (20) un (21).

Izveidojam matemātisko modeli programmā Mathcad:

$$L := 0.1 \quad m := 1 \quad J_0 := m \left(\frac{L}{2} \right)^2$$

$$M_0 := 2C \quad KT := 1000 \quad B := 0.01 \quad b := 0.1 \quad c := 9 \epsilon$$

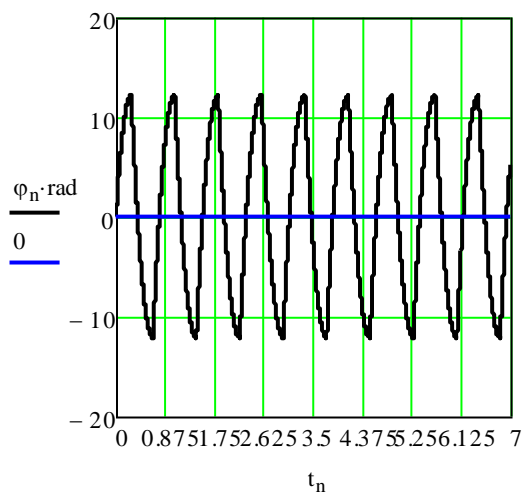
$$n := 0..7000 \quad s := 0.001 \quad t_n := n \cdot s$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

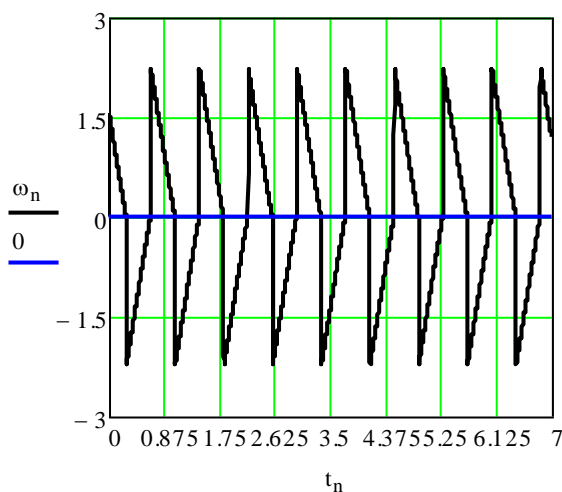
$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M_0 \cdot \text{sign}(\omega_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

Izmantojam iepriekšējā modelī atrastās optimālās parametru vērtības.

Iegūstam sekojošus grafiskus rezultātus:

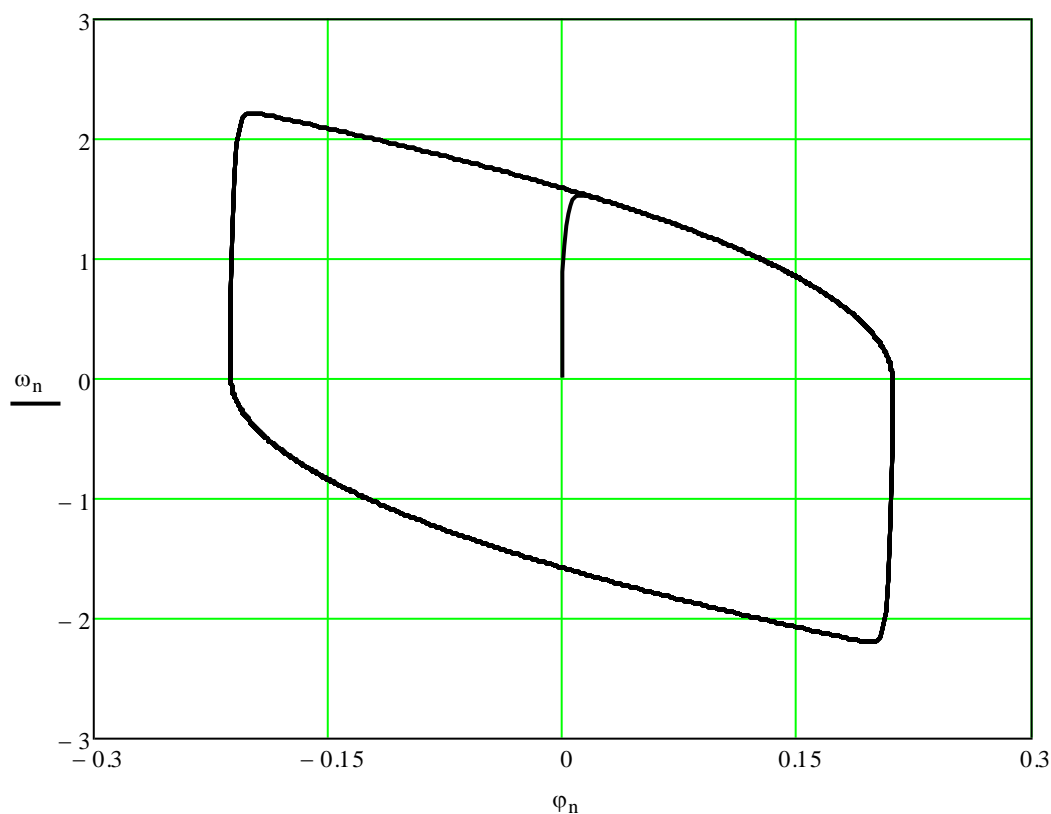


Att. 4.3.2. astes pagrieziņa leņķis laikā



Att. 4.3.3. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums laikā

Attēlos 4.3.2. un 4.3.3. redzam astes pagrieziņa leņķi φ laikā t un astes pagrieziņa leņķisko ātrumu ω laikā t . Astes pagrieziņa leņķa vērtības uzskatāmības labad norādītas grādos, ne radiānos. Abscisu ass gradēta sekundēs. Simulācijas laiks 7 sekundes atstāts no iepriekšējās simulācijas, kurā tas bija pietiekams laika sprādis, lai matemātiskais modelis šajā laikā paspētu iegūt stacionāru, stabilu darba režīmu. Tas labi redzams astes pagrieziņa leņķa φ un leņķiskā ātruma ω fāzu plaknē attēlā 4.3.4.

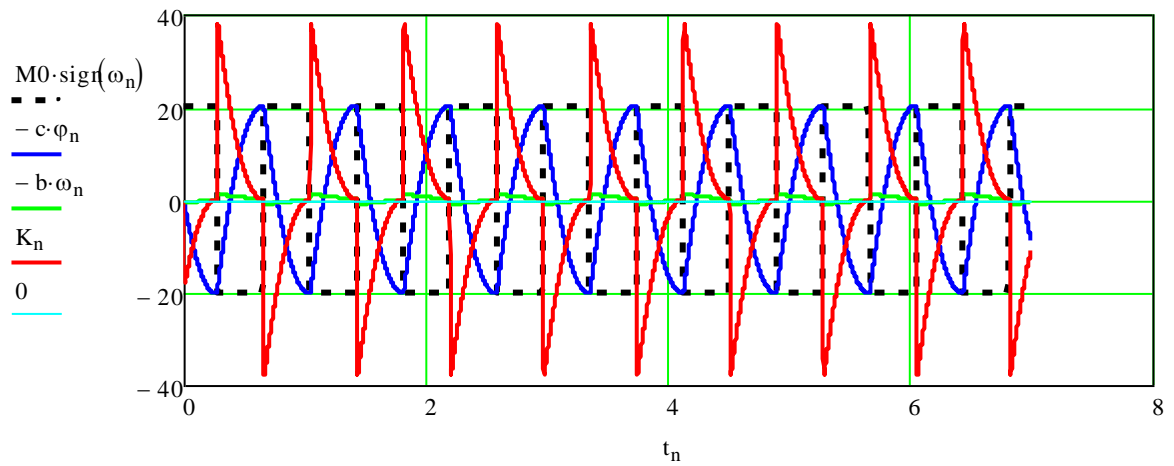


Att. 4.3.4. Astes kustība fāzu plaknē.

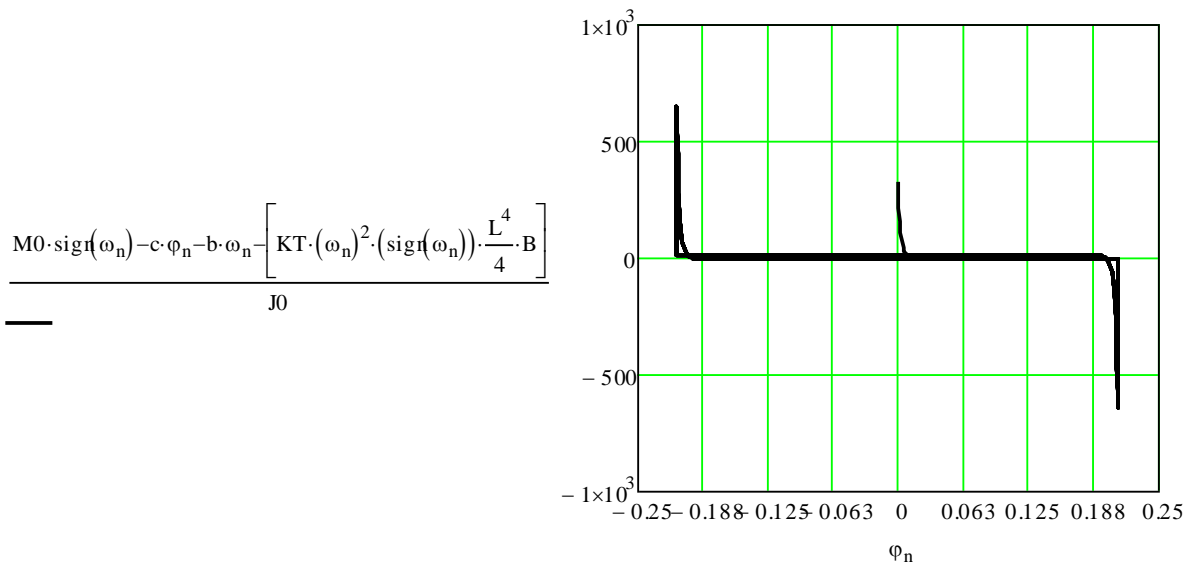
Astes kustība sākas no „0” stāvokļa (tādi sākuma nosacījumi), un šķietami jau pirmā periodā atrodas stacionārā režīmā.

Aplūkojot ūdens pretestības radīto spēku, atsperes radīto spēku, demfera radīto spēku un pielikto harmonisko momenta spēku vienā grafikā varam pārlicināties, ka harmoniskais vadības momenta radītais spēks diametrāli pretēji mainās ar pārējiem spēkiem, kuri tam pretojas, kā tam arī vajadzētu būt (att. 4.3.5.). Demferēšanas spēka komponente ir salīdzinoši maza, bet mainīt parametru uz lielāku nav jēgas, jo tas tikai pasliktinātu rezultātu. Matemātiski dotajā modelī bez demferēšanas varētu iztikt vispār, bet sintezējot reālu robotu no šī demferēšanas efekta izvairīties neizdosies. Ļoti uzskatāmi redzams ūdens pretestības spēku iedarbības raksturs. Pretestības spēki ļoti krasi sasniedz savu maksimālo vērtību pie kustības virziena maiņas. Tas notiek pateicoties relatīvi lielajam astes stingumam.

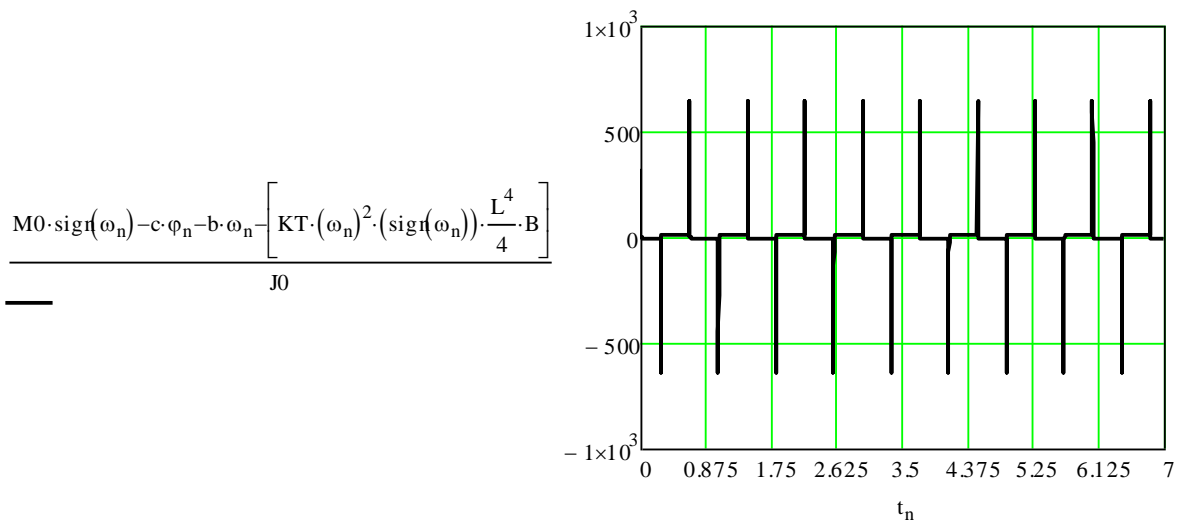
Astes paātrinājumi laikā un pārvietojuma fāzu plaknē grafiski attēloti attēlos 4.3.6. un 4.3.7.



Att. 4.3.5. Astes kustību ietekmējošie spēki laikā.



Att. 4.3.6. Astes paātrinājums kustības fāzu plaknē.



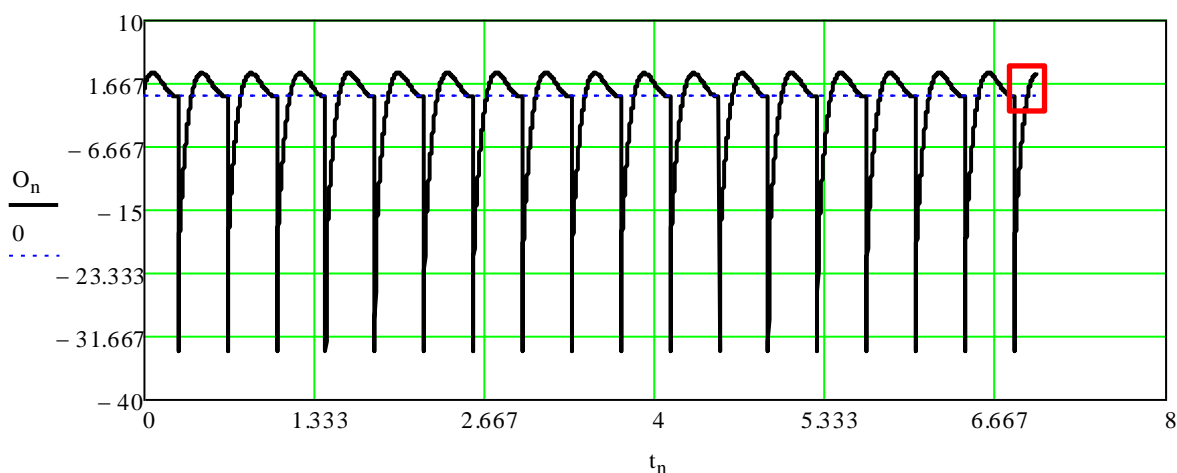
Att. 4.3.7. Astes paātrinājums laikā.

Pateicoties lielajam atsperes stingumam, astes leņķiskais paātrinājums virziena maiņas brīdī sasniedz ļoti lielas vērtības.

No (32) iegūstam reakcijas spēku šarnīrā:

$$O_n := m \cdot \left[\left(\omega_n \right)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi_n) + \left[\frac{\left(M_0 \cdot \text{sign}(\omega_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n \right) + K_n \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right) \dots}{J_0} + K_T \cdot \left(\omega_n \right)^2 \cdot \left(\text{sign}(\omega_n) \right) \cdot \frac{L^3}{3} \cdot B \cdot \sin(\varphi_n) \right] \right] \quad (34)$$

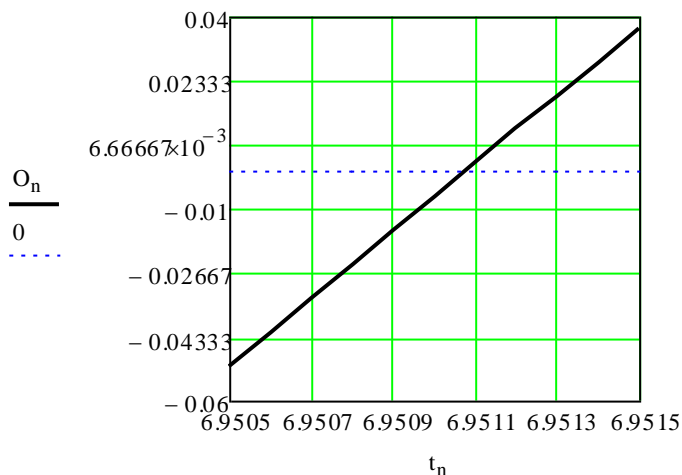
Un tā grafisko attēlojumu (att. 4.3.8.):



Att. 4.3.8. Astes radītā reakcija šarnīrā.

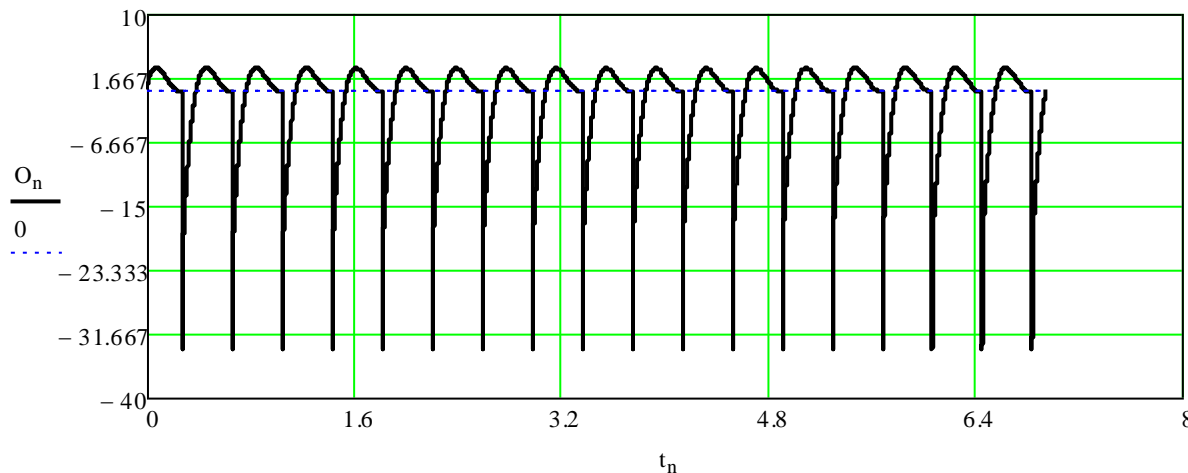
No attēlā 4.3.8. redzamā grafika redzams, ka stabils režīms pastāv visu simulācijas laiku.

Noteikt spēka vidējo vērtību iespējams apskatot vienu pilnu periodu vai vairāku periodu vidējo vērtību summas izdalot ar simulācijas soļu skaitu. Aprēķina soļu tabulu neveidojam, bet pierēgulējam simulācijas laiku, lai simulācija beigtos reizē ar pēdējo periodu. Kā redzams grafikā (att. 4.3.8.), aiz pēdējā pilnā perioda seko nākamā perioda iesākums. Apskatām tuvplānā (att. 4.3.9.).



Att. 4.3.9. Astes radītā reakcija šarnīrā tuvplānā.

Redzams, ka grafiks krusto „0” punktu simulācijas laika momentā 6.9511 sekundes. Samazinām simulācijas soļu skaitu no 70000 uz 69511 un iegūstam jaunu grafiku (att. 4.3.10.):



Att. 4.3.10. Astes radītā reakcija šarnīrā ar korektētu simulācijas soļu skaitu.

Šoreiz astes reakcijas grafikā (att. 4.3.10.) redzam tikai pilnus periodus, līdz ar to varam precīzi noteikt vidējo astes radīto reakcijas spēku šarnīrā. Nepieciešams integrēt reakcijas spēku šarnīrā un izdalīt ar kopīgo soļu skaitu kā (22), (23):

$$S_x := \sum_{n=0}^{69511} (O_n) \quad (35)$$

$$\frac{S_x}{69511} = -1.397$$

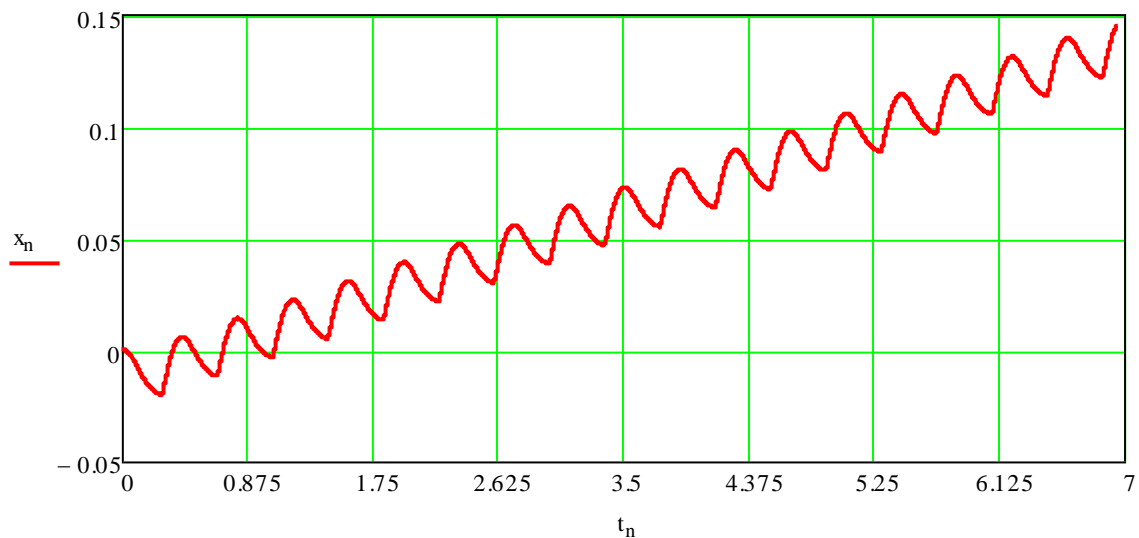
kur:

S_x - reakcijas spēka šarnīrā integrālis soļu intervālā $0 - 69511$.

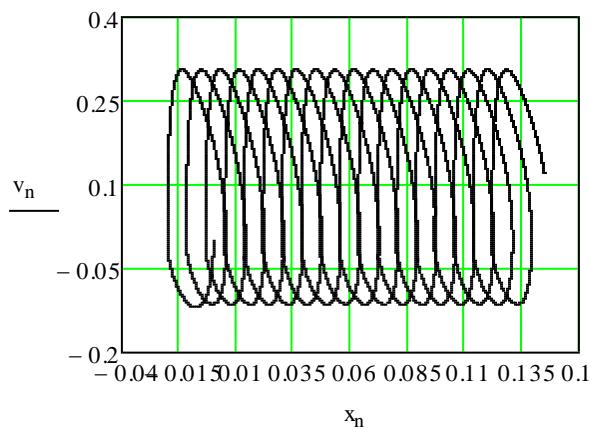
Iegūtais vidējais reakcijas spēks ir -1.397 N, kas ir daudz labāks rezultāts kā (23).

Lai pārbaudītu, kādu iespaidu šis reakcijas spēka šarnīrā impulss rada uz peldošu objektu, izmantojam esošo peldoša objekta vienādojumu sistēmu (24) ar maksimālo soļu skaitu 69511.

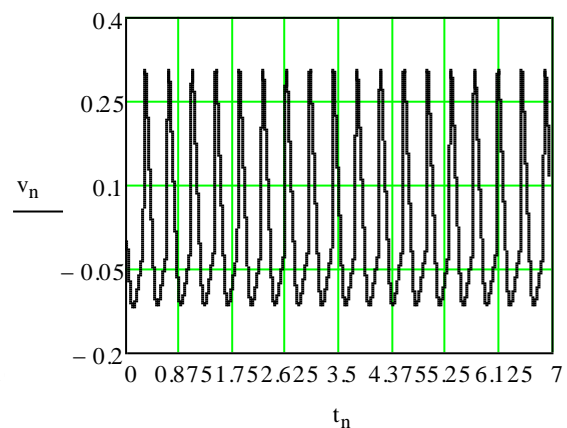
Iegūstam sekojošus korpusa pārvietojuma, ātruma kustības laikā (att. 4.3.11., 4.3.13.) un fāzu plaknē (att. 4.3.12) grafiskos rezultātus:



Att. 4.3.11. Korpusa pārvietojums laikā.



Att. 4.3.12. Korpusa kustība fāzu plaknē.



Att. 4.3.13. Korpusa ātrums laikā.

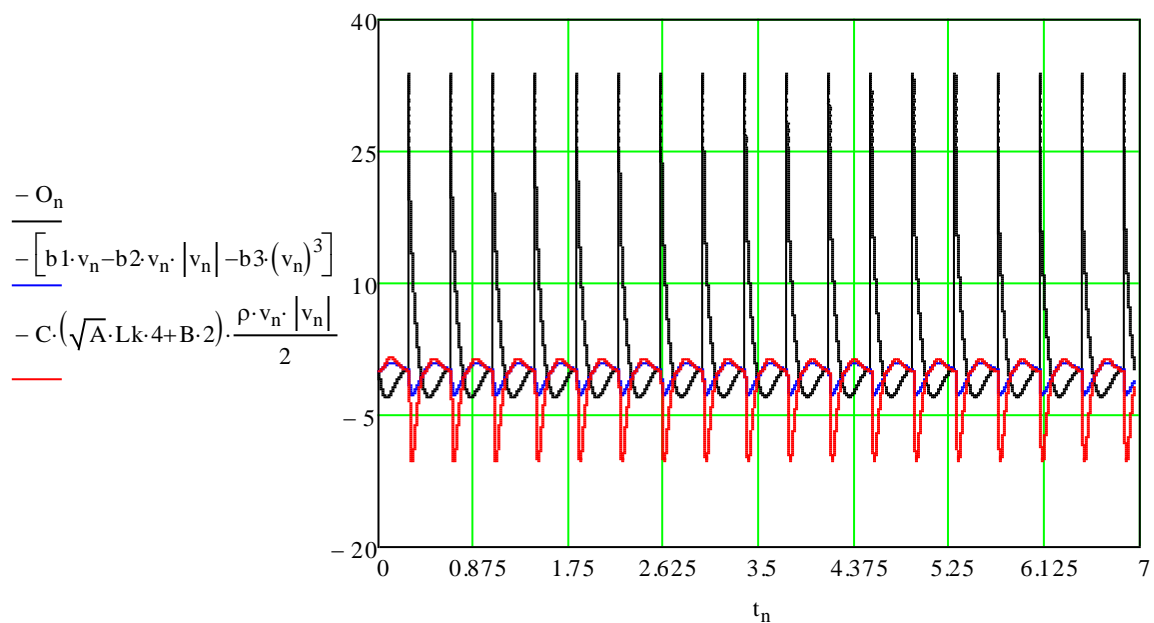
Kā redzams no grafiskajiem attēlojumiem, korpusa kustība visā simulācijas laikā ir stabila un atbilstoši propulsijas spēkam pozitīva. Nosakām korpusa vidējo ātrumu, izvēloties visu darbības diapazonu. Iegūstam sekojošu rezultātu:

$$V_x := \sum_{n=0}^{69511} (v_n) \quad \frac{V_x}{69511} = 0.02086 \quad (36)$$

kur V_x – korpusa vidējais ātrums simulācijas laikā.

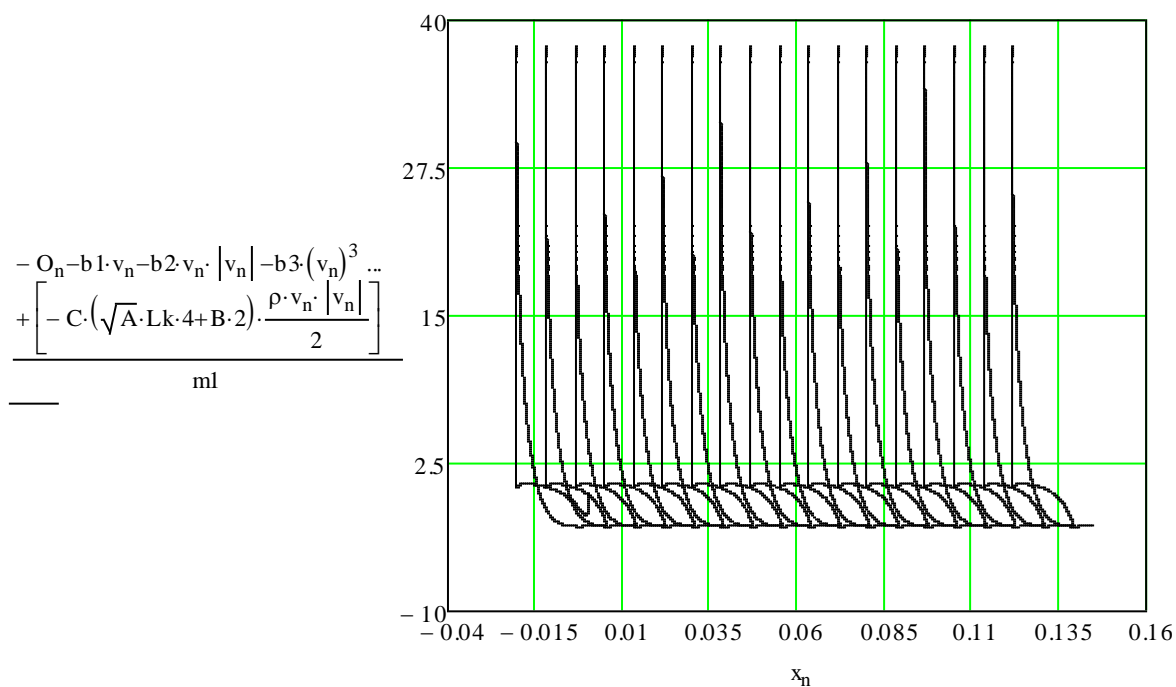
Iegūtais vidējais korpusa ātrums ir 20.9 mm sekundē, kas ir daudz labāks kā modelim ar harmonisku astes ierosmi (1.82 mm sekundē), taču modeļos ir izmantoti dažādi parametri. Lai objektīvi novērtētu rezultātu, nepieciešams izrēķināt efektivitāti. Attēlā 4.3.14. redzami visi spēki, kas darbojas uz korpusu (un asti – frikcijas berzes spēks) laikā. Kā jau varēja

paredzēt, pretestības spēki darbojas pretēji virzes spēkam, kas vēlreiz aplicina matemātiskā modeļa pareizību.



Att. 4.3.14. Spēki, kas darbojas uz korpusu laikā.

Un paātrinājuma grafiks kustības fāzu plaknē (att. 4.3.15.):



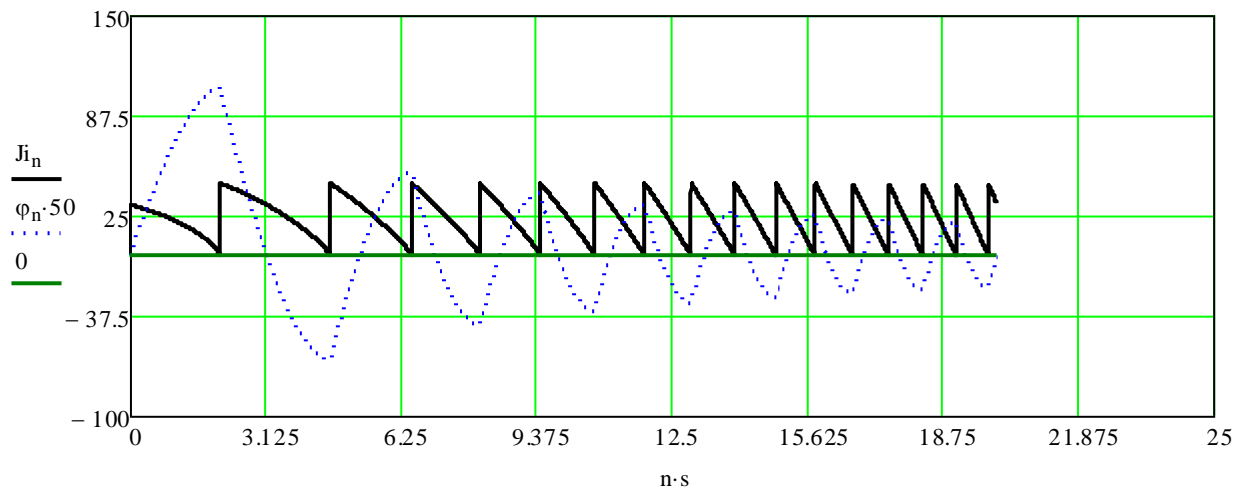
Att. 4.3.15. Korpusa paātrinājums kustības fāzu plaknē.

Aprēķinām jaudas un lietderības koeficientu pēc (11).

Aprēķinām ievadīto jaudu (attēlots grafiski 4.3.16.):

$$J_{i_n} := \left| M_0 \cdot \text{sign}(\omega_n) \right| \cdot \left| \omega_n \right| \quad (37)$$

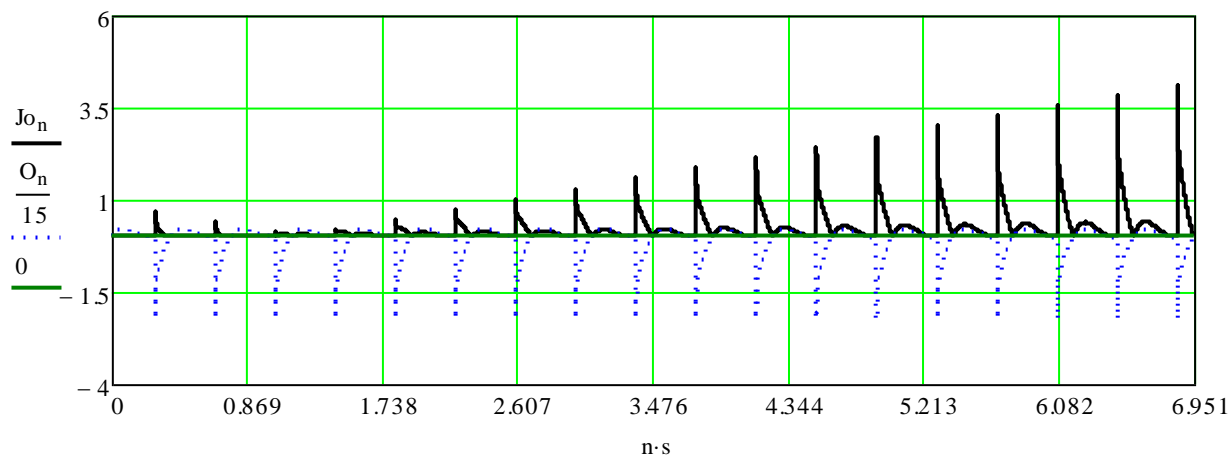
$$S_{Ji} := \sum_{n=0}^{20025} (J_{i_n}) \quad S_{ji} := \frac{S_{Ji}}{20025} \quad S_{ji} = 23.456$$



Att. 4.3.16. Ievadītās jaudas grafiks laikā.

Aprēķinām iegūto jaudu kā (25) (attēlots grafiski 4.3.17.):

$$S_{Jo} := \sum_{n=0}^{69511} (J_{o_n}) \quad S_{jo} := \frac{S_{Jo}}{69511} \quad S_{jo} = 0.212$$



Att. 4.3.17. Iegūtās jaudas grafiks laikā.

Lietderības koeficients:

$$\eta := \frac{S_{j0}}{S_{ji}} \cdot 100 \quad \eta = 0.968$$

Iegūtais rezultāts ir pozitīvs, lai arī neliels. Dotā neoptimizētā modeļa efektivitāte gandrīz divas reizes pārsniedz optimizētā harmoniskā modeļa efektivitāti. Par galveno iemeslu var minēt kustības ātrumu starpību no „0” stāvokļa līdz maiņas punktam un atpakaļ, kas labi redzams attēlā 4.3.4. Modelis ar adaptīvu ierosmi nodrošina lielāku astes ātrumu pie atspēriena tādējādi radot lielāku efektīvo impulsu. Iemesli šādam iznākamam var būt dažādi. Arī šajā nodaļā apskatītais modelis 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. Ir iegūts labāks pozitīvs korpusa pārvietojums, taču rezultāts joprojām ir neapmierinošs. Optimizējam sistēmu izvēloties efektīvākus parametrus.

4.4. Peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi un parametru optimizāciju

Optimizējam sistēmu ievēdot mainīgo parametru kā parādīts (10).

Pirms optimizācijas jāizvēlas parametri, kurus optimizēt. Šajā gadījumā nemainīsim sistēmas fiziskos parametrus, turpretī pētīsim atsperes stinguma koeficienta ietekmi uz sistēmas darbību. Izvēlētais parametrs parādīts tabulā 4.4.1.:

Tab. 4.4.1. Optimizējamais parametrs

Optimizācijas parametrs	Nozīme	Vērtība pirms optimizācijas	Optimizācijas parametra apakšējā robeža	Optimizācijas parametra augšējā robeža
c	Atsperes stingums	20	5	50

Izveidojam Mathcad modeli ar atsperes stinguma mainīgu vērtību:

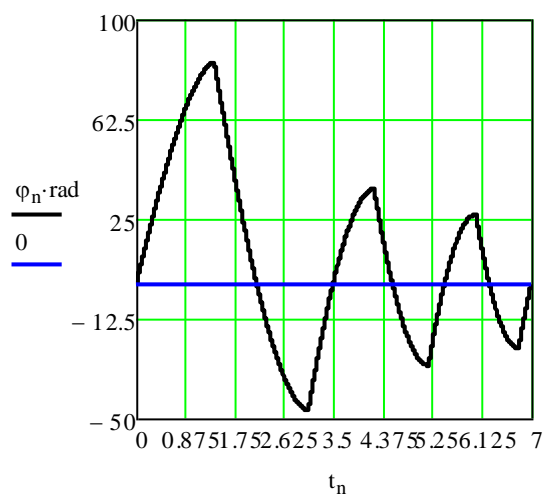
$$\begin{aligned}
 L_n &:= 0.1 & m_n &:= 1 & J0_n &:= m_n \left(\frac{L_n}{2}\right)^2 \\
 M0 &:= 20 & KT &:= 1000 & B &:= 0.01 & b &:= 0.1 & c_n &:= 9 \\
 n &:= 0..7000 & s_n &:= 0.001 & t_n &:= n \cdot s & ds &:= 5 & db &:= 5 & Mc &:= \frac{db - ds}{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_n \\ c_n \\ \omega_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ ds \\ 0.001 \end{pmatrix}$$

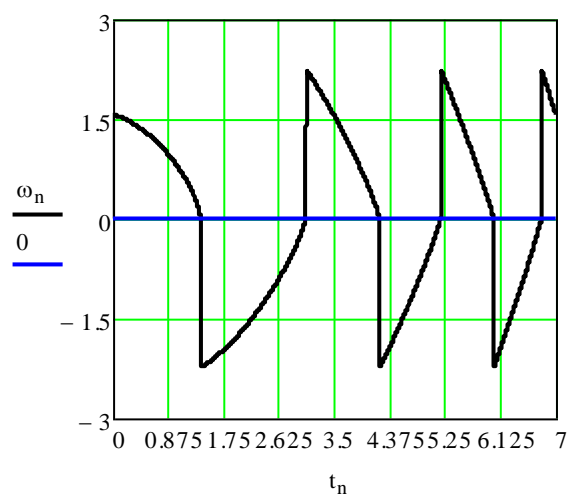
$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ c_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ ds + n \cdot s \cdot Mc \\ \omega_n + \frac{s}{J0} \cdot \left[M0 \cdot \text{sign}(\omega_n) - c_n \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot B \right] \right] \end{bmatrix}$$

Atsperes stinguma koeficienta funkcija kā (24).

Iegūstam astes kustības grafikus (att. 4.4.1., 4.4.2.):



Att. 4.4.1. astes pagrieziņa leņķis

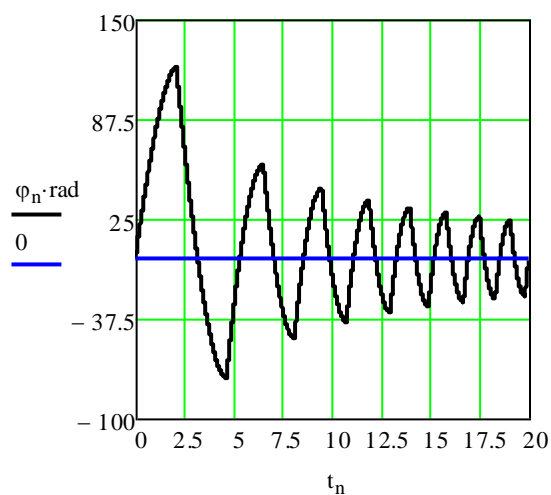


Att. 4.4.2. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums

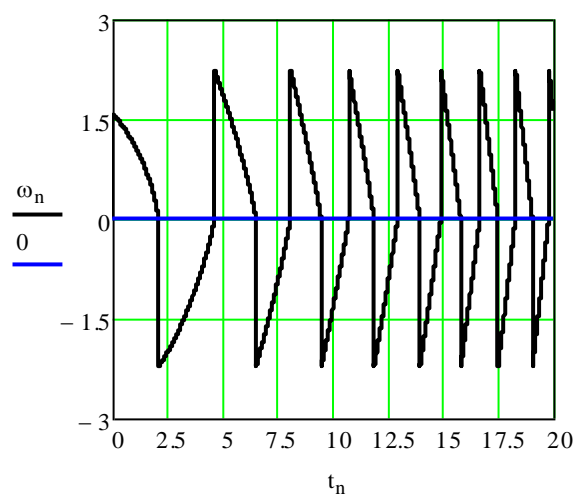
Iegūstam kustības grafikus ar tikai 3 periodiem, jo samazinātā atsperes stinguma dēļ stingri palielinājusies kustības amplitūda. Nepieciešams palielināt simulācijas laiku. Palielinām soļu skaitu līdz 20000 un palielinām soļa izmēru līdz 0.001, lai taupītu skaitļošanas laiku. Skaitliskās simulācijas laiks palielināts līdz 20 sekundēm.

n := 20000 s := 0.00

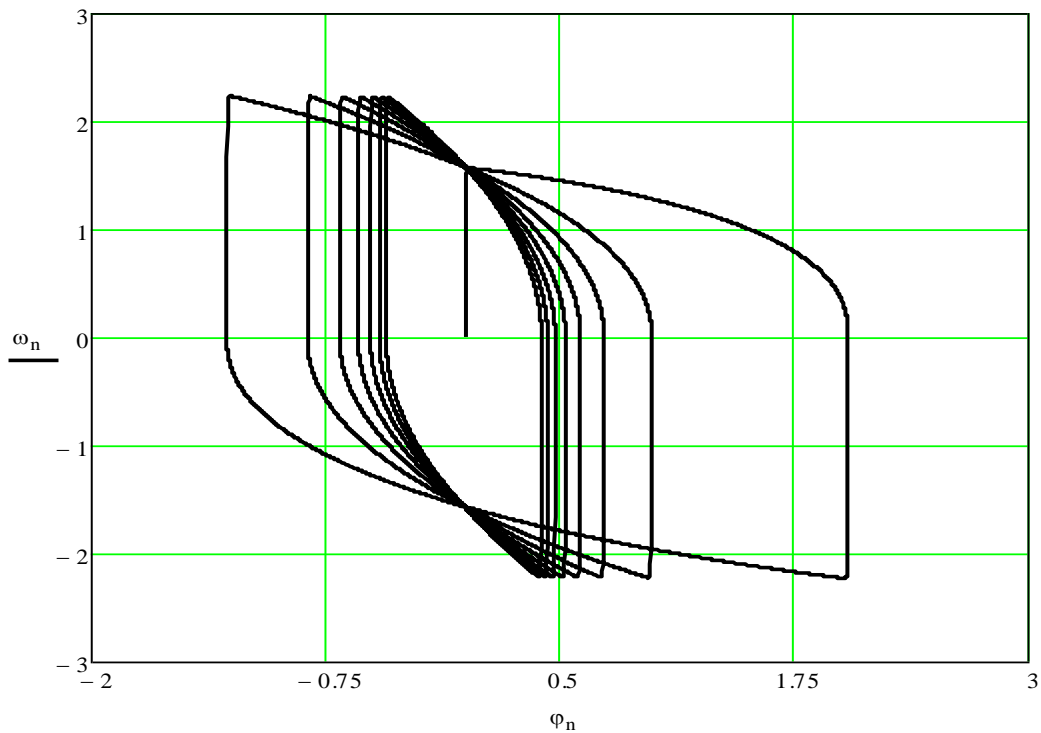
Iegūstam jaunus kustības grafikus (att. 4.4.3., 4.4.4., 4.4.5.):



Att. 4.4.3. astes pagrieziņa leņķis

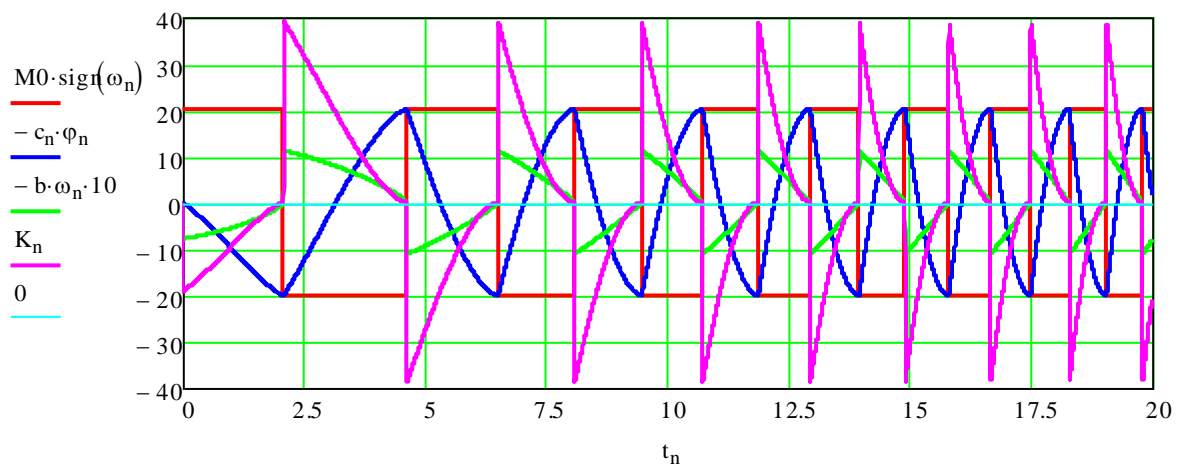


Att. 4.4.4. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums



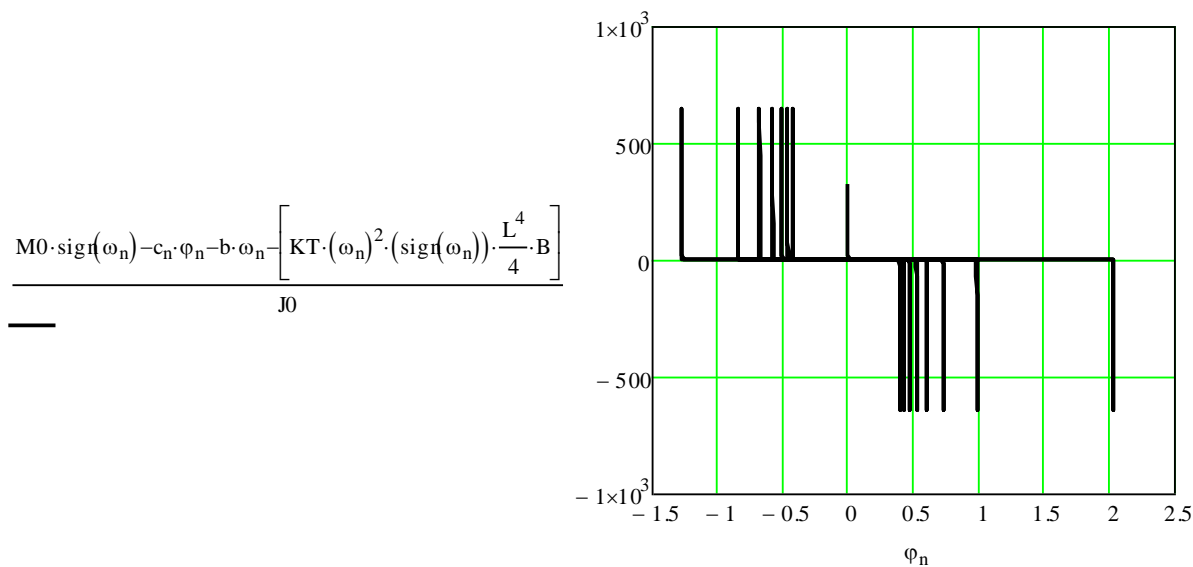
Att. 4.4.5. astes kustība fāzu plaknē.

Astes kustība tāpat kā iepriekš sākas no „0” stāvokļa (tādi sākuma nosacījumi), taču stacionāru režīmu neatrod. Pie mainīga parametra tas ir normāli. Aplūkojot ūdens pretestības radīto spēku, atsperes radīto spēku, demfera radīto spēku un pielikto adaptīvo momenta spēku vienā grafikā varam pārlicināties, ka harmoniskais vadības momenta radītais spēks joprojām diametrāli pretēji mainās ar pārējiem spēkiem, kuri tam pretojas, kā tam arī vajadzētu būt (att. 4.4.6.). Redzams, ka spēku amplitūdas laikā gandrīz nemainās, kas ir interesanti. Kustības ātruma pieaugums kompensē samazināto amplitūdu demfera un ūdens pretestības radītajiem spēkiem, līdz ar to spēku vērtības saglabājas, bet palielinās vibrāciju ātrums.

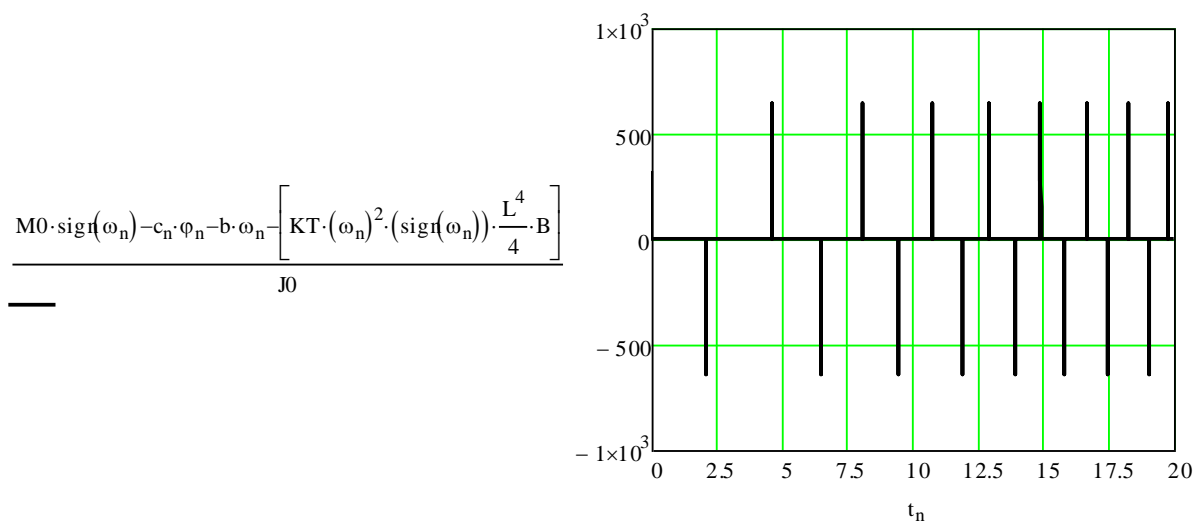


Att. 4.4.6. Uz asti darbojošies spēki laikā.

Astes pātrinājumi laikā un pārvietojuma fāzu plaknē grafiski attēloti attēlos 4.4.7. un 4.4.8.



Att. 4.4.7. Astes pātrinājums pārvietojuma plaknē.

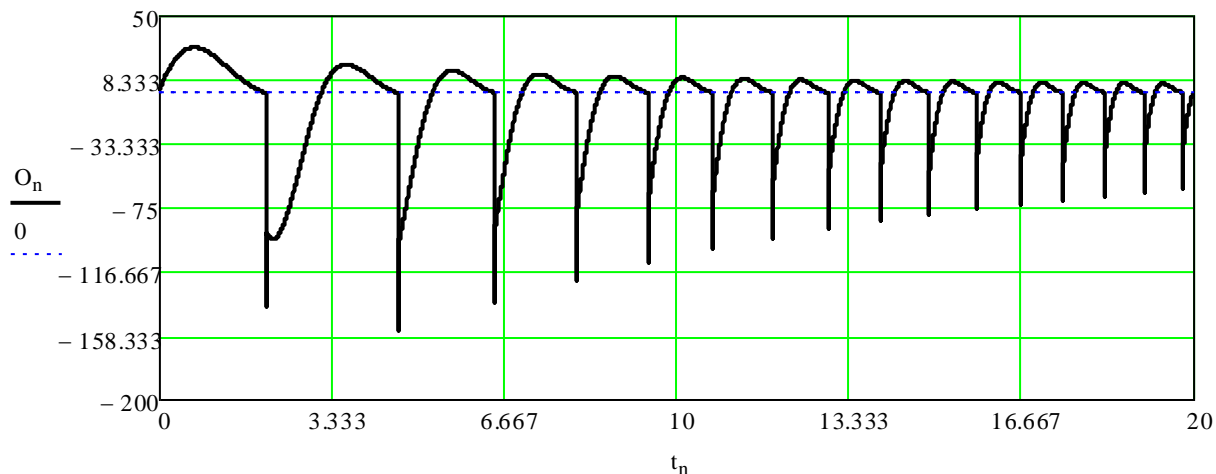


Att. 4.4.8. Astes pātrinājums laikā.

No (33) iegūstam astes reakciju pret peldošā objekta korpusu. Šoreiz ar mainīgu parametru:

$$O_n := m \cdot \left[\left(\omega_n \right)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi_n) + \left[\frac{(M_0 \cdot \text{sign}(\omega_n) - c_n \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n) + K_n \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right)}{J_0} \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right) \dots \right] \right. \\ \left. + KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^3}{3} \cdot B \cdot \sin(\varphi_n) \right] \quad (38)$$

Iegūstam astes reakcijas grafisko izpildījumu (att. 4.4.9.):

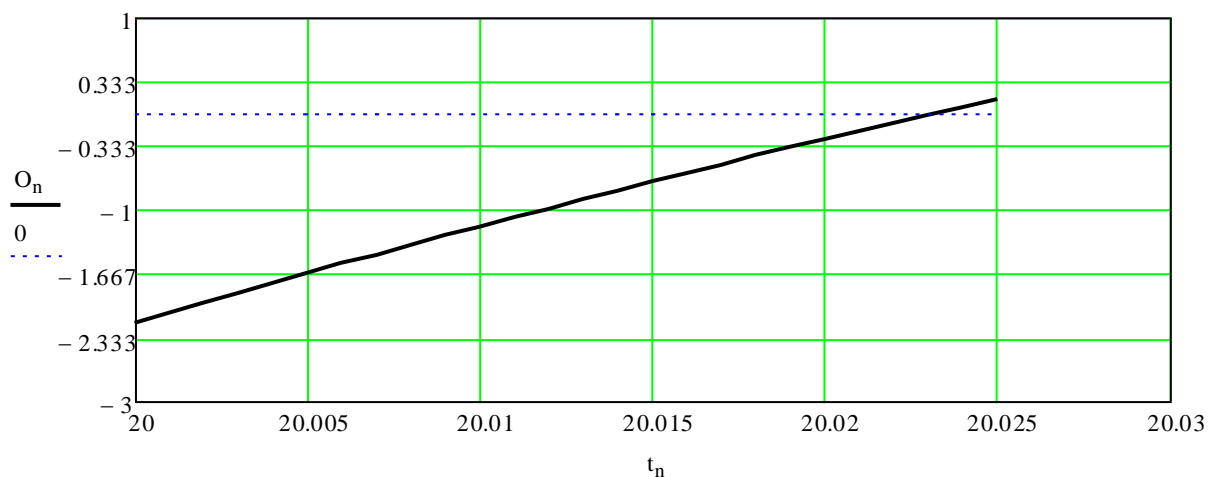


Att. 4.4.9. Astes reakcija laikā.

No grafika redzams, ka reakcija laikā mazinās. Kustības režīms diezgan stabils. Varam sagaidīt efektivitātes pasliktināšanos pie lielām c_n vērtībām.

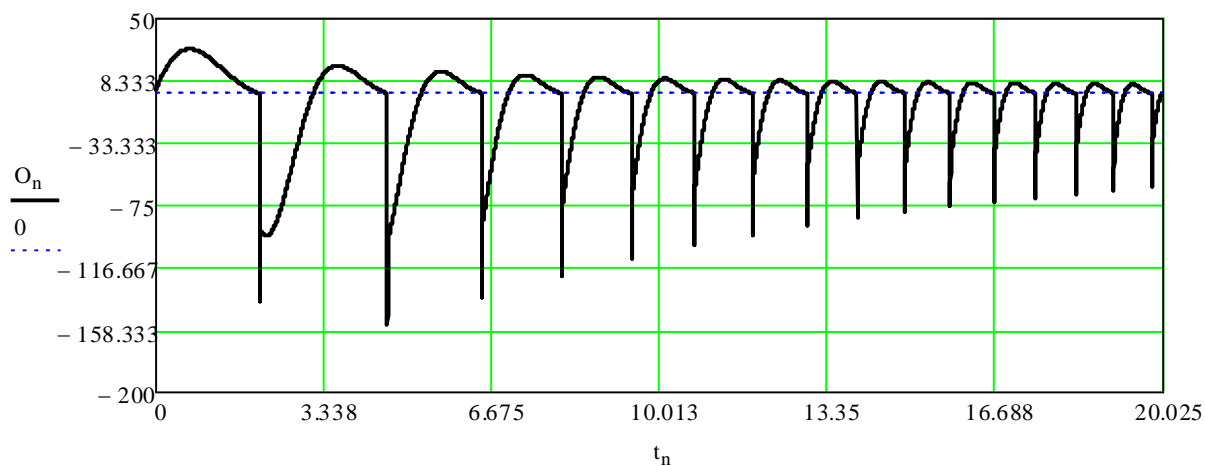
Pielietojam iepriekš izmantoto metodoloģiju ar vidējo spēka vērtību soļu diapazonā ar veseliem periodiem. Nepieciešams pierēgulēt simulācijas garumu, lai tā beigtos ar veselu periodu. Izmantosim jaudas attiecību visā diapazonā, kura vairs nebūs konstante (26). Tad diapazonā var meklēt efektīvākos periodus un pētīt tuvāk.

$n := 20000..21000$



Att. 4.4.10. Astes reakcija laikā šaurā diapazonā.

„0” vērtību pēdējais periods sasniedz pie simulācijas laika 20.025 sekundes (att. 4.4.10.). Palielinām simulācijas soļu skaitu no 20000 līdz 20025. Iegūstam simulāciju ar pilniem periodiem. Astes reakcija ar pilniem periodiem attēlā 4.4.11.



Att. 4.4.11. Astes reakcija laikā.

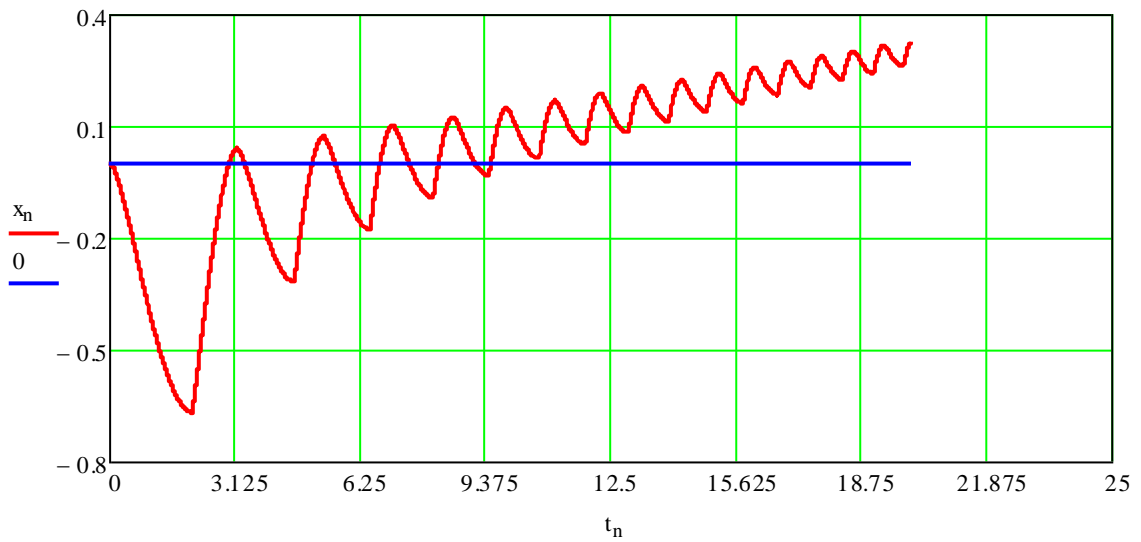
Modelējam peldošu objektu kā (24):

$$\begin{aligned} \underline{A}_{\text{AAA}} &:= 0.030.0\text{;} & \rho_0 &:= 100\text{;} & L_k &:= 1 & m_1 &:= \rho_0 A \cdot L_k \\ \rho &:= 100\text{;} & b_1 &:= 8.3\text{;} & b_2 &:= -1 & b_3 &:= 0.00\text{;} & \underline{C}_{\text{AAA}} &:= 1 \end{aligned}$$

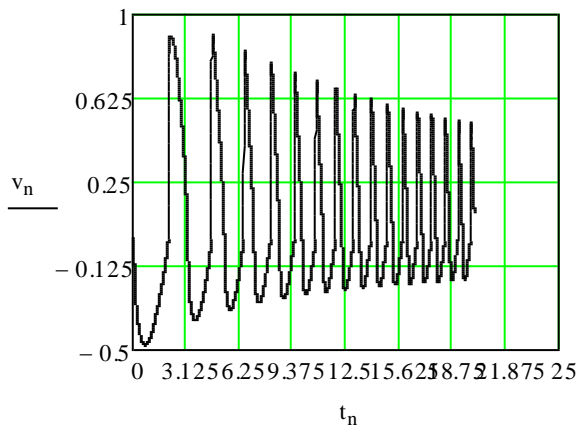
$$\begin{pmatrix} x_0 \\ v_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_{n+1} \\ v_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} x_n + s \cdot v_n \\ v_n + \frac{s}{m_1} \cdot \left[-O_n - b_1 \cdot v_n - b_2 \cdot v_n \cdot |v_n| - b_3 \cdot (v_n)^3 - C \cdot (\sqrt{A} \cdot L_k \cdot 4 + B \cdot 2) \cdot \frac{\rho \cdot v_n \cdot |v_n|}{2} \right] \end{bmatrix}$$

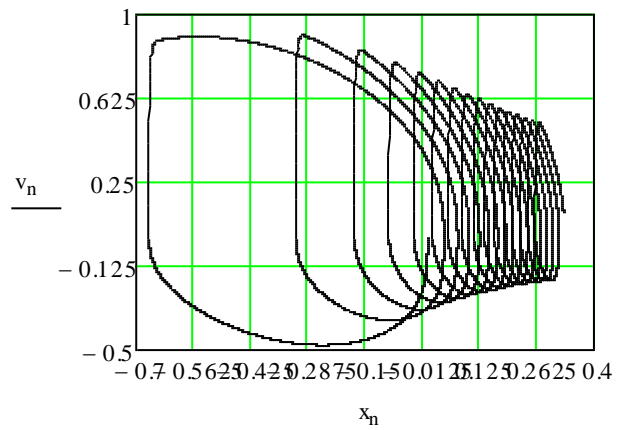
Iegūstam grafiski objekta pārvietojuma grafiku laikā (att. 4.4.12.), ātruma grafiku laikā (att. 4.4.13.) un kustību pārvietojuma fāzu plāknē (att. 4.4.14.):



Att. 4.4.12. Objekta pārvietojums laikā.

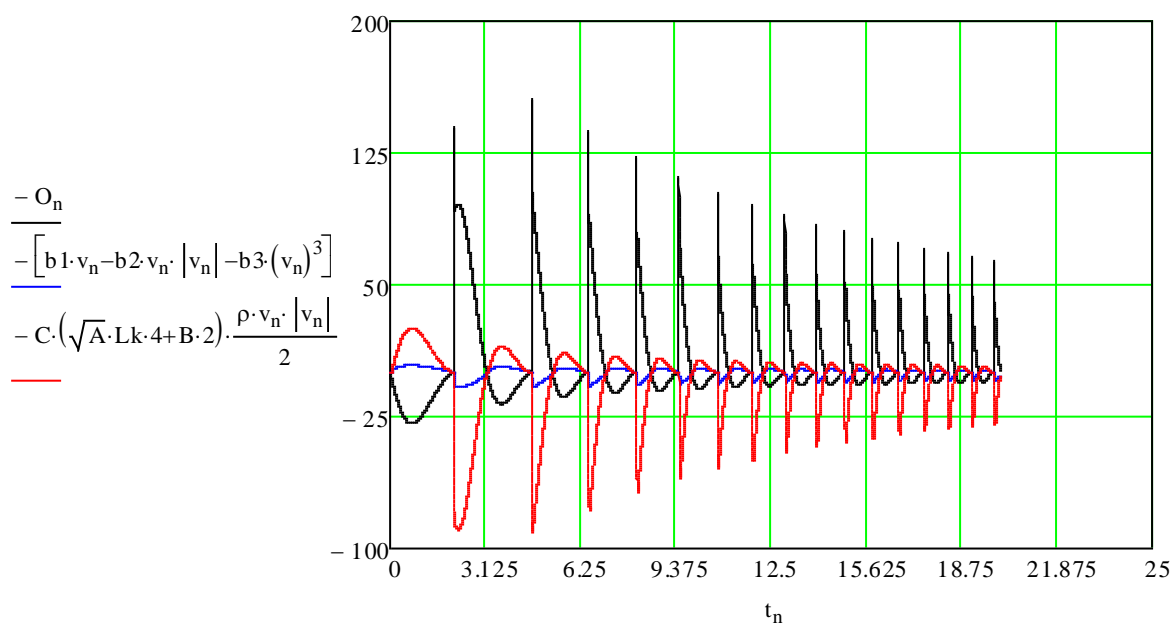


Att. 4.4.13. Objekta ātrums laikā.



Att. 4.4.14. Objekta kustība fāzu plaknē.

Kā redzams, samazinoties astes reakcijas amplitūdai laikā, tās dzītā objekta pārvietojums ir stabili pozitīvs un ātrums saglabājas neskatoties un svārstību amplitūdas kritumu. Visu spēku disipācija labi redzama attēlā 4.4.15.

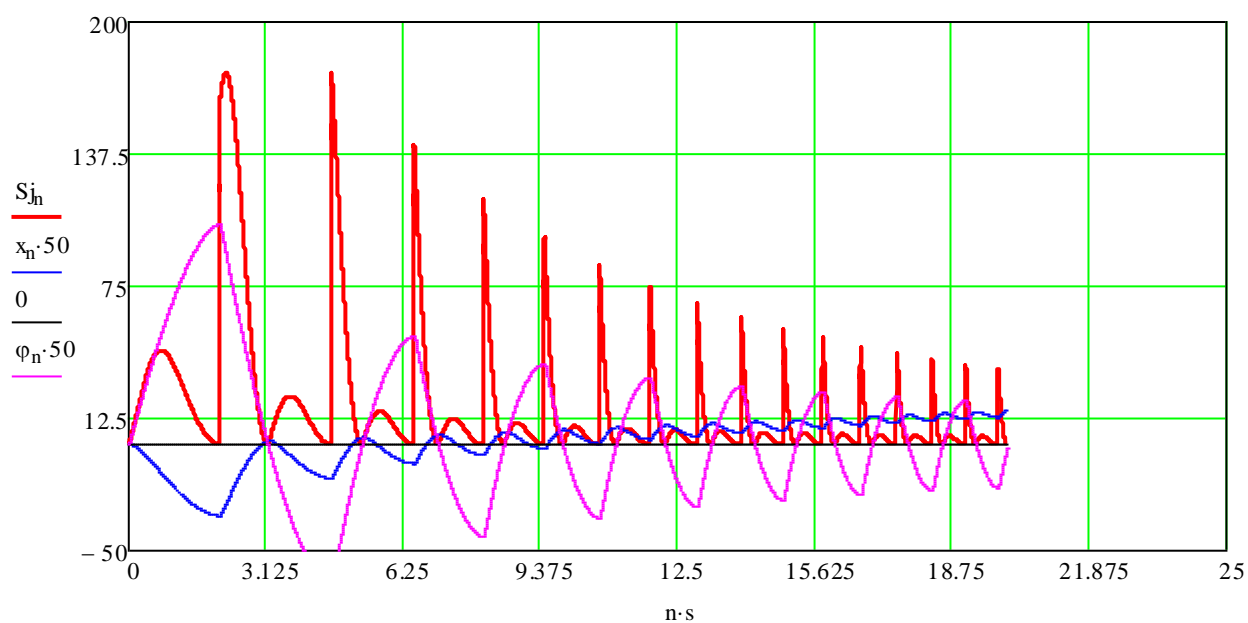


Att. 4.4.15. Uz objektu darbojošies spēki.

No (25), (26) un (37) iegūstam:

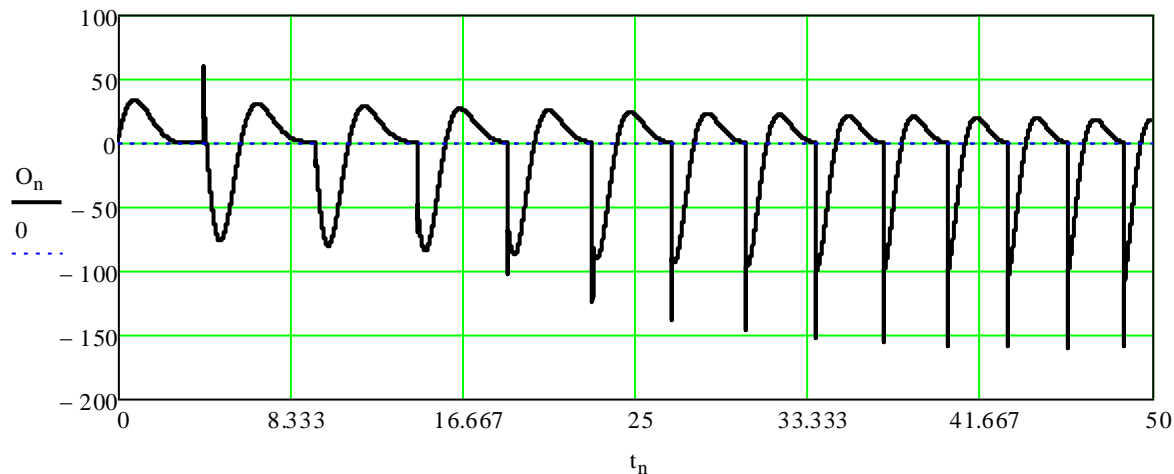
$$S_{j_n} := \frac{|O_n| \cdot |v_n|}{|M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n)| \cdot |\omega_n|} \cdot 100 \quad (39)$$

Modelējam un iegūstam grafiski (att. 4.4.16.). Uzskatāmības labad grafikā norādīts arī objekta pārvietojums laikā, astes pagrieziņa leņķis laikā, kā arī „nulles” līnija.



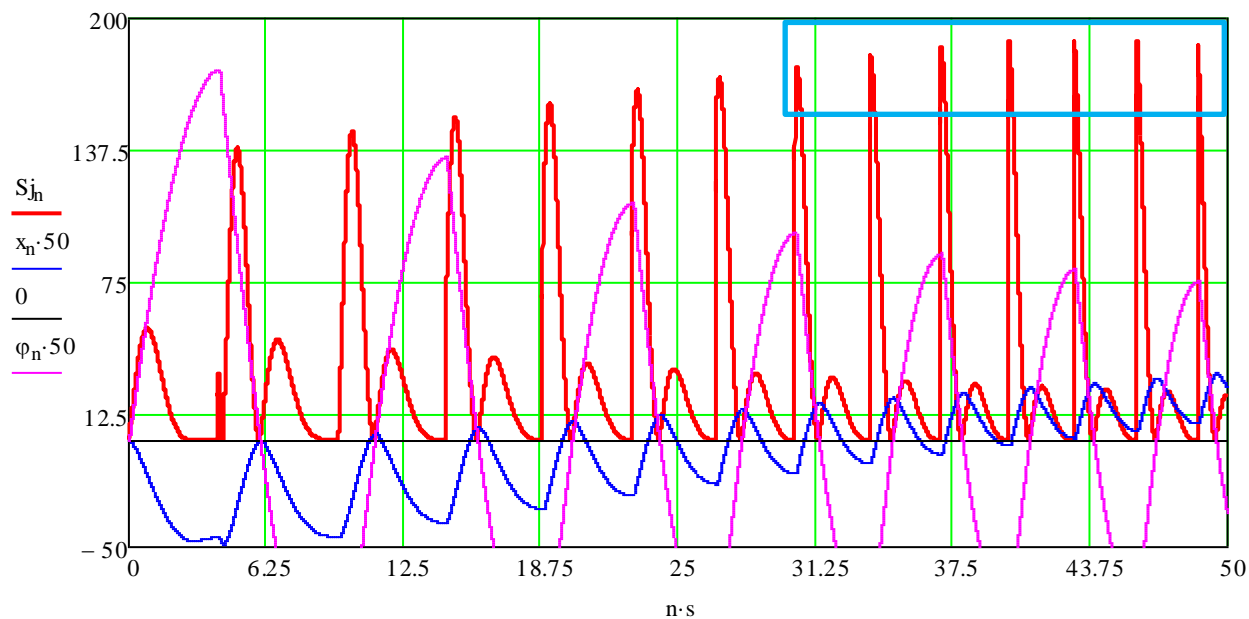
Att. 4.4.16. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Redzams, ka lielākās efektivitāšu vērtības novietojušās pirmajos 3 darbības periodos. Pēc tam efektivitāte pakāpeniski krīt. Varam secināt, ka efektīvākā atsperes darbība ir laika diapazonā no 0 – 6 s no simulācijas sākuma, kas dod atsperes stinguma vērtības $c = [5 ; 13.5]$. Par cik stipri samazinām atsperes stinguma vērtību diapazonu, mazinās arī darba frekvence. Izvēlamies jaunu mainīgā parametra raksturlīkni ar mums interesējošo parametra diapazonu c . Iegūstam sistēmu ar astes reakcijas amplitūdas pieaugumu (att. 4.4.17.):



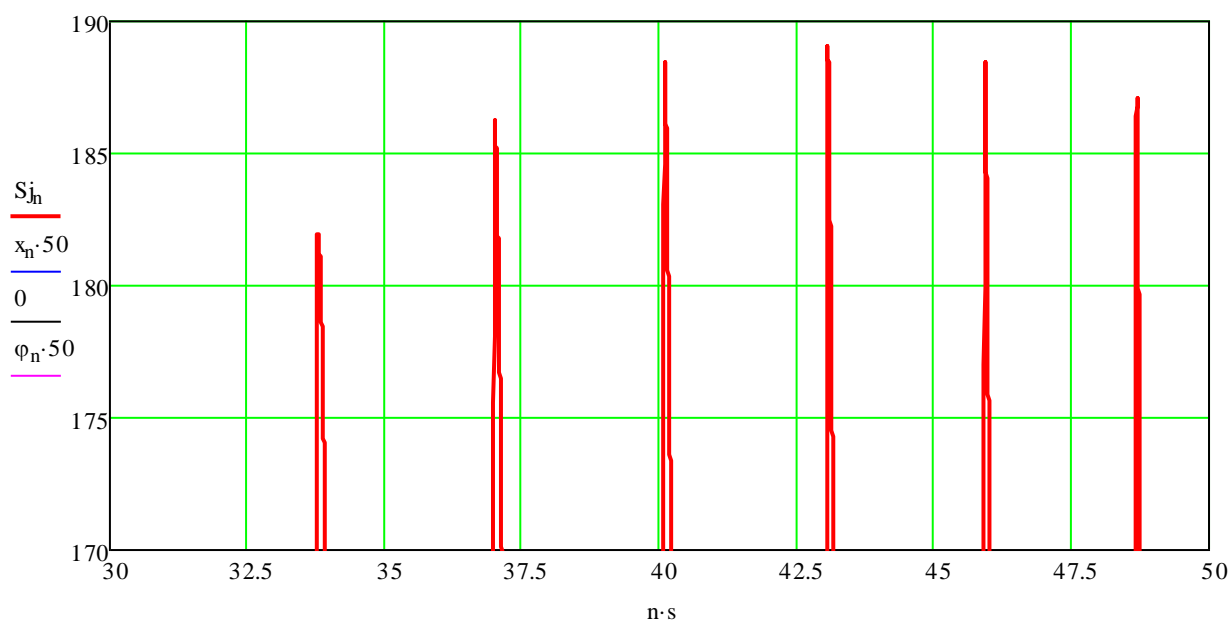
Att. 4.4.17. Astes reakcija laikā.

Iegūstam sistēmas efektivitātes grafiku (att. 4.4.18.):



Att. 4.4.18. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Kā redzams, efektivitātes maksimumi koncentrējušies simulācijas laikā starp 30. un 50. sekundi. Apskatām tuvāk (att. 4.4.19.):



Att. 4.4.19. Sistēmas ar mainīgu parametru efektivitāte laikā.

Visaugstāko efektivitātes vērtību sistēma sasniedz četrdesmit trešajā simulācijas sekundē, kurā c_n vērtība lineāri pieauga no 7.14 – 7.65.

Šādi ar secīgiem soļiem var samazināt mainīgā parametra diapazonu līdz tādām apjomam, kad to jau var uztvert par konstanti. Iegūstam efektivitāti:

$$\eta := \frac{S_{j0}}{S_{j1}} \cdot 100 \quad \eta = 29.578$$

Dotā gadījumā efektīvākā sistēmas darbība izrādījās pie sistēmas frekvences $c = 7.56$.

Iegūtais optimizētas sistēmas efektivitātes rezultāts 29.6% pamatīgi pārsniedz iepriekšējo 0.968%, kas liecina par atsperes stinguma nozīmi šādā sistēmā.

Piedāvātā optimizācijas metode arī šinī gadījumā darbojas apmierinoši, un ir pielietojama šāda tipa uzdevumu risināšanai. Sasniegtie sistēmas efektivitātes rezultāti ir diezgan labi, tomēr stipri atpaliek no reālu bionisku ķermeņu analoga pielietojuma rezultātiem. Iespējams, mainot vēl citus parametrus, ieskaitot sistēmas parametrus, ir iespējams iegūt vēl labākus rezultātus, taču ne daudz. Cieta, neelastīga aste ar adaptīvu ierosmi arī neizrādījās labākais šāda propulsijas tipa risinājums.

4.5. Peldoša objekta propulsijas modelis ar harmonisku ierosmi un laukuma maiņu

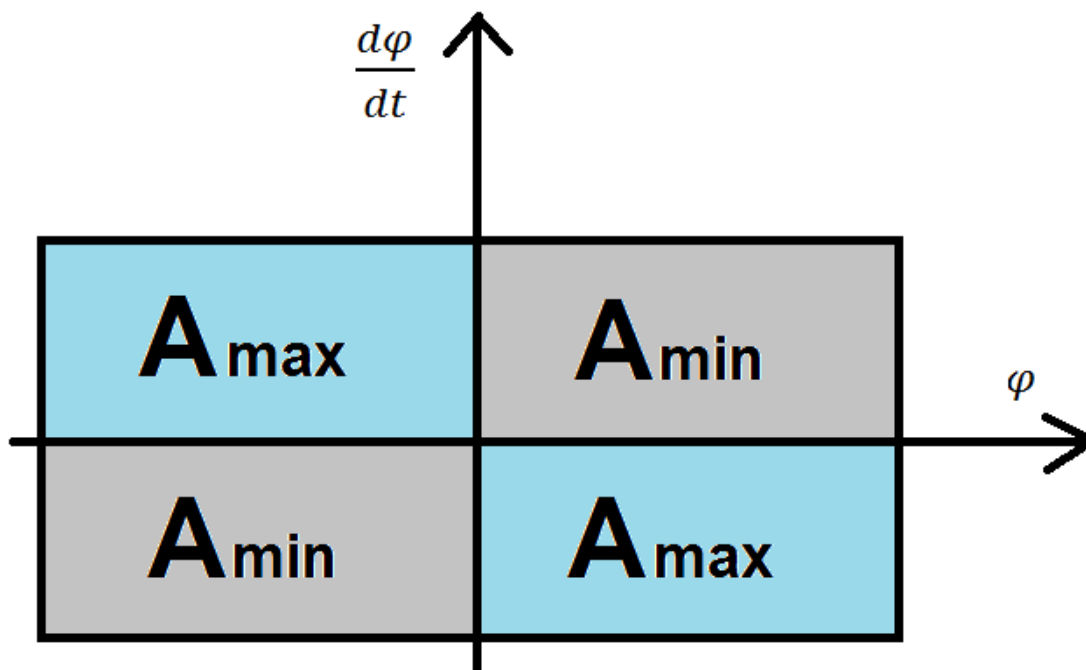
Ņemot vērā iepriekšējā nodaļā izdarītos secinājumus par cietas astes tipa propulsijas iespējām un ierobežojumiem, šinī sakarā tiek piedāvāta inovācija, uz kā pamata arī gūts patents [34.] – cieta, harmoniska aste ar **mainīgu darba laukumu**.

Tiek uzskatīts, ka, kontrolēti mainot astes vēdekļa laukumu dažādās kustības fāzēs, iespējams iegūt daudz lielāku tā efektivitāti attiecībā uz radīto vilces spēku.

Ideja radusies apgrieztās inženierijas ceļā, kur pētot vibrējošus priekšmetus dažādās plūsmās novērojama to laukumu maiņa uz deformāciju rēķina (karogs vējā) tādējādi mainot virsmas laukumu, uz kuru iedarbojas apkārtējās vides spēki.

Sākotnēji pētījuma mērķis bija parādīt gaisa vai šķidruma plūsmas ierosmes praktiskā pielietojuma iespējas vibrotehnikā. Tiek analizēta vibromašīnas ar konstantu gaisa vai šķidruma plūsmas ierosmi dinamika. Pirmais pētījums veltīts mašīnas izpildorgāna vibrācijas kustības analīzei gadījumā, kad gaisa vai šķidruma plūsmas ātrums ir konstants lielums. Pamatideja ir 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 sākuma pozīcijas līdz galējam stāvoklim. Ātrdarbības problēmas risināšanai izmantots Pontrjagina maksimuma princips. Parādīts kā pie optimālas vadības darba laukumam jāpieņem robežvērtības. Ieviesti arī ierobežojumi uz fāžu koordinātēm.

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 4.5.1.



Att. 4.5.1. 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. Matemātiskais modelis apskatīts nodaļā 5.2.

Secinājumi

1. Apskatītais peldoša objekta modelis ar adaptīvu ierosmi izrādījās krietni efektīvāks par modeli ar harmonisko ierosmi, tomēr joprojām netika sasniegta dabā sastopamo propulsijas iekārtu veikspēja. 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.
2. 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 peldoša 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.

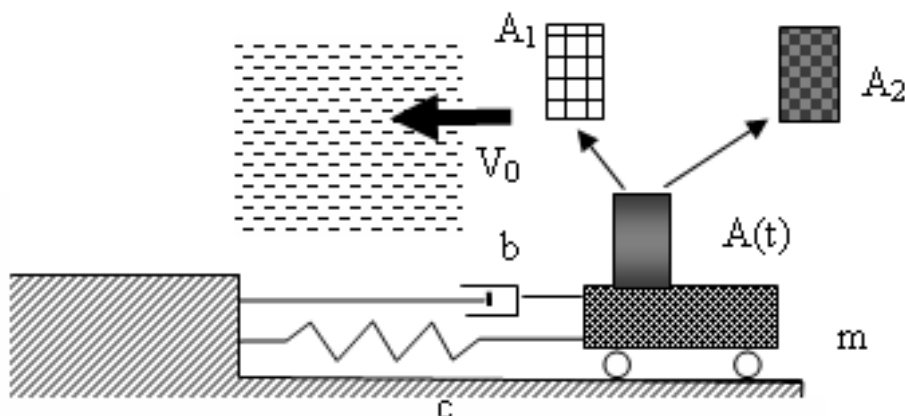
5. ROBOTIZĒTU MODEĻU DINAMIKAS ANALĪZE

5.1. Vibrāciju ierosmes robots ar konstantas plūsmas ierosmi

Vibrāciju ierosmes robota ar vienu kustības brīvības pakāpi un konstantu apkārtējās vides plūsmu shematiskais modelis redzams attēlā 5.1.1. [35]. Sistēma sastāv no masas m , kas caur atsperi c un demferi b piestiprināti nekustīgai pamatnei. Masai pievienots ir mainīgs laukums A , uz kuru iedarbojas apkārtējās vides plūsma. Mērķis ir atrast optimālo laukuma A maiņas likumu $A(t)$ robežās:

$$A_1 \leq A(t) \leq A_2, \text{ kur} \quad (40)$$

A_1 un A_2 – lielākais un mazākais masas m virsmas laukums.



Att. 5.1.1. Sistēmas ar laukuma $A(t)$ maiņu dinamiskais modelis

Dotās sistēmas modeļa kustības matemātiskais vienādojums ir [35]:

$$m \ddot{x} = -c x - b \dot{x} - u(t) \cdot (V_0 + \dot{x})^2, \quad (41)$$

kur $u(t) = A(t) \cdot k$, $u(t)$ ir vadības funkcija, k - konstante; \ddot{x} , \dot{x} un x - paātrinājums, ātrums un masas m pārvietojums; V_0 apkārtējās vides konstants ātrums. Ir nepieciešams noteikt vadību $u = u(t)$, lai pārvietotu masu no sākuma pozīcijas $x(t_0)$ uz gala pozīciju $x(t_1)$ iespējami mazā laika periodā $K = T$ (K ir kritērijs), ja laukumam $A(t)$ ir robežas (40).

Saskaņā ar [36-38], kritēriju K risinot lielu ātrumu problēmas var tikt pārrakstīts sekojošā formā:

$$K = \int_{t_0}^{t_1} 1 \cdot dt \quad (42)$$

Pieņemot no (42) $t_0 = 0$ un $t_1 = T$, var pieņemt, ka $K = T$. Lietojot aizvietošanu $x_1 = x$ un $\dot{x}_1 = \dot{x}_2$, vienādojums (41) var tikt pārvērsts sekojošā formā:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_2; \quad m \dot{x}_2 = -c x - b \dot{x} - u(t) \cdot (V_0 + \dot{x})^2 \quad (43)$$

Šajā gadījumā Hamiltonian H pieņem sekojošu formu [39]:

$$H = \psi_0 + \psi_1 x_2 + \psi_2 \frac{1}{m} \cdot (-c x_1 - b x_2 - u(t) \cdot (V_0 + x_2)^2), \quad (44)$$

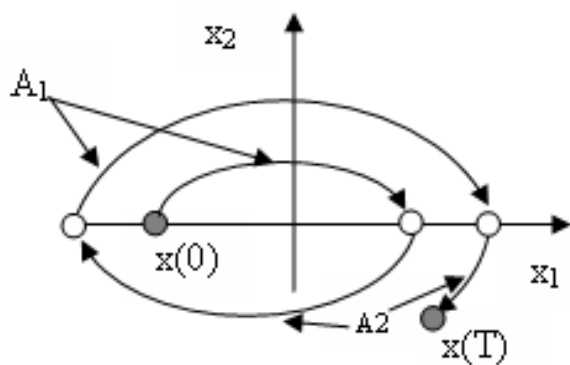
kur $H = \psi \cdot X$. Parametru ψ nosaka sekojoši:

$$\psi = \begin{Bmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{Bmatrix}; \quad X = \begin{Bmatrix} 0 \\ x_2 \\ \frac{1}{m} \cdot [-c x_1 - b x_2 - u(t) \cdot (V_0 + x_2)^2] \end{Bmatrix} \quad (45)$$

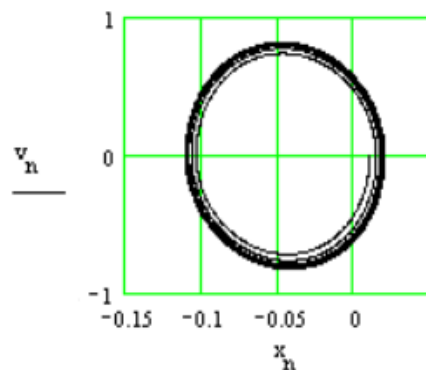
Divu pēdējo vektoru funkciju ψ un X (Hamiltona H) skalārajam reizinājumam ienmēr jābūt maksimālam. [36-39]. Lai nodrošinātu šo maksimumu, vadībai $u(t)$ jābūt robežās starp $u(t) = u_1$ un $u(t) = u_2$, kas ir atkarīgs tikai no funkcijas ψ_2 zīmes, kuru apraksta sekojošais [36, 39]:

$$H = \max H, \quad \text{ja } \psi_2 \cdot (-u(t) \cdot (V_0 + x^2)^2) = \max \quad (46)$$

Pie tam, ja $\psi_2 > 0$, tad $u(t) = u_1$, bet ja $\psi_2 < 0$, tad $u(t) = u_2$, kur $u_1 = A_1 \cdot k$ un $u_2 = A_2 \cdot k$, skatīt (40). Galvenais optimālas vadības likuma meklēšanas secinājums var tikt formulēts sekojoši: laukuma A vērtībai jebkurā laika sprīdī ir jābūt intervāla gala stāvoklī (40) – $A(t) = A_1$ vai $A(t) = A_2$. Reālās sistēmās tas ļauj sintezēt kvazi optimālas vadības darbību (piemēri [40, 41]). Optimālas vadības piemērs parādīts attēlos 5.1.2. un 5.1.3. (modelēšana veikta programmā MathCAD).



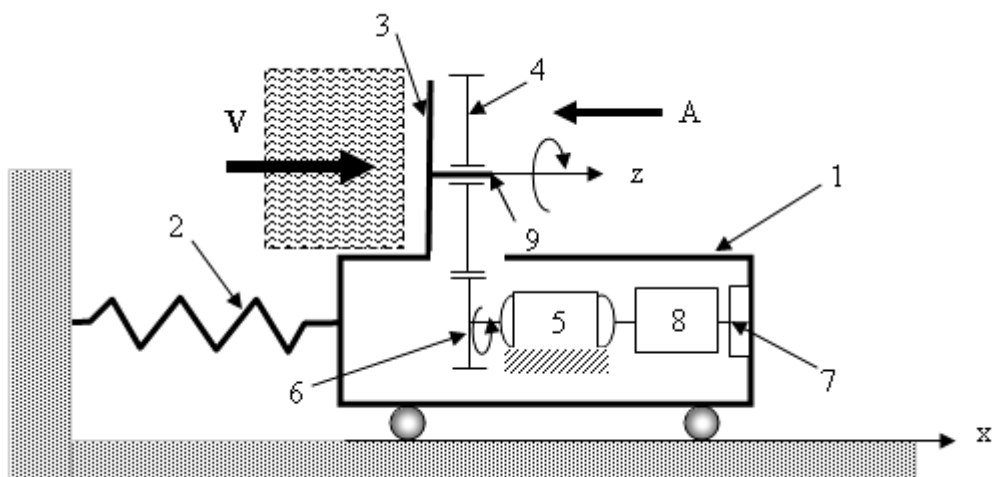
Att.5.1.2. Optimāla vadība ar 3 pārslēgpunktiem, kad $x_2 = 0$



Att. 5.1.3. Kustība fāzu plaknē ar sākuma nosacījumiem robežu iekšpusē

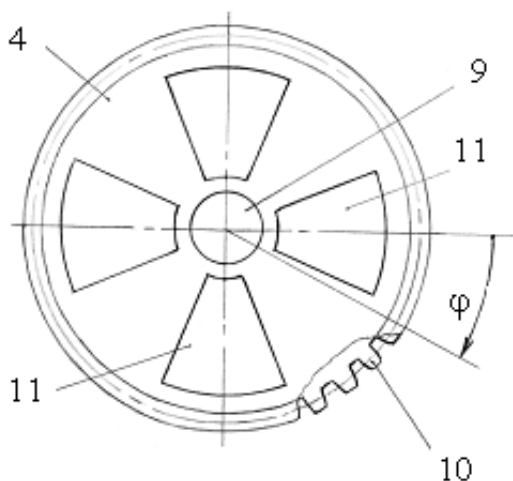
Sistēmas kustība sākas punktā ar koordināti $x_1(0) = -x_0$ un $x_2(0) = \dot{x}(0) = 0$ (Att. 5.1.1). Sistēmas kustības laikā mainīgā laukuma $A(t)$ vērtība ir jāmaina punktos pa x_1 asi, piemēram $x_2 = \dot{x} = 0$. Katrs nākamais kustības posms ir raksturīgs ar palielinājumu \dot{x}_{\max} ātruma vērtībai. Šādi process turpinās, kamēr sistēma nostājas līdzsvara stāvoklī uz robežas trajektorijas (att. 5.1.3.). Līdzsvaru nosaka balanss starp dzenošo vides plūsmas spēku un pretestības spēku. Šādu adaptīvu sistēmu darbība ir ļoti stabila pateicoties ierosmes un slāpējošo spēku atkarības no ātruma otrajā pakāpē.

Sintezētas mehatroniskas sistēmas ar apkārtējās vides plūsmas ierosmi un adaptīvu vadību darba shēma parādīta attēlā 5.1.4. [42]. Iekārtas darba instruments 1 ir savienots nekustīgu pamatni caur elastīgu elementu 2. Sistēmas vibrāciju ierosme ir realizēta ar apkārtējās vides plūsmas V iedarbību uz tam paredzētu ekrānu, kurš sastāv no 2 galvenajām daļām – stacionārais disks 3 un rotējošais disks 4. Disks 4 spēj rotēt ap z asi un tādā veidā mainīt savu relatīvo pozīciju pret disku 3. Diska 4 rotāciju nodrošina soļu dzinējs 5 caur transmisiju 6. Kustības uztvērējs 7 dod vadības signāla impulsu, kas proporcionāls darba instrumenta kustībai \dot{x} . Vadības signāls caur pulsācijas ģenerēšanas sistēmu 8 tiek nodots uz soļa motoru 5.



Att. 5.1.4. Vibroiekārtas ar apkārtējās vides ierosmi un adaptīvu vadību shematiskā diagramma

Rotējošā diska 4 viens no dizaina variantiem parādīts attēlā 5.1.5. (saskan ar skatu A attēlā 5.1.4.). Abiem diskos 3 un 4 ir identiski atvērumi 11, vienādi izvietoti pa riņķa līniju. Atvērumi 11 diskos 3 un 4 var sakrist vai nesakrist, un tas ir atkarīgs tikai no diska 4 pagriešanas leņķa φ . Ja atvērumi 11 uz abiem diskos sakrīt, tad efektīvās frontālās virsmas laukums ir minimāls A_{\min} , bet, ja atvērumi uz diskos nesakrīt, tad efektīvās frontālās virsmas laukums ir maksimāls A_{\max} .



Att. 5.1.5. Rotējošo disku dizaina variants

Pie tam, efektīvo virsmas laukumu A ir iespējams variēt plašās robežās. Ierosmes spēku P , kas darbojas uz darba instrumentu, ar aprēķināt pēc sekojošas vienādības:

$$P = k \cdot \rho \cdot A \cdot V_r^2, \quad (47)$$

kur koeficients k nosaka ekrāna ģeometriskās īpatnības; ρ ir apkārtējās vides blīvums; $V_r = (V - \dot{x})$ - relatīvais apkārtējās vides kustības ātrums.

Piedāvātā vadības sistēma nodrošina maksimālo A_{\max} vērtību, kamēr darba instruments kustas apkārtējās vides kustības virzienā, un minimālo A_{\min} vērtību, kamēr darba instruments kustas pretēji apkārtējās vides kustības virzienam. Saskaņā ar vienādojumu (6), ierosmes spēks P mainās kopā ar laukumu A . Šeit ļoti svarīgi ir nodrošināt spēka P maiņu no P_{\min} uz P_{\max} kustības maiņas brīžos, jeb kad darba instrumenta ātrums \dot{x} sasniedz 0. Ar šādu rīcību iespējams sasniegt iekārtas maksimālo efektivitāti.

5.2. Propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu matemātiskais modelis

Vienkāršu peldoša robota propulsijas iekārtas modeli ar mainīgu virsmas laukumu var izveidot no 2 daļām – korpuss un vādekļis jeb aste, kuri tiek uzskatīti par absolūti cietiem ķermeņiem (att. 5.2.1.). Korpuss un vādekļis savā starpā ir savienoti ar šarnīru. Korpuss kustas pa x asi, bet vādekļis rotē ap šarnīru.

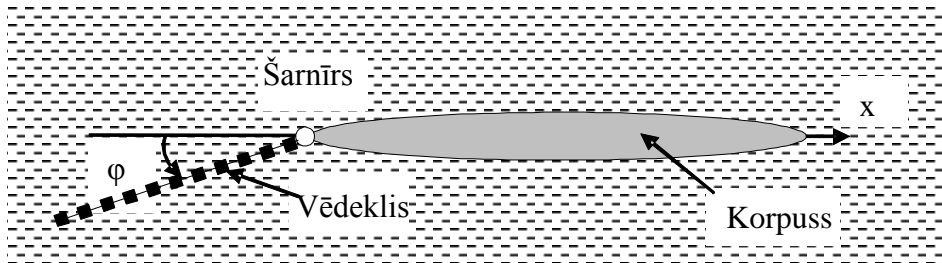
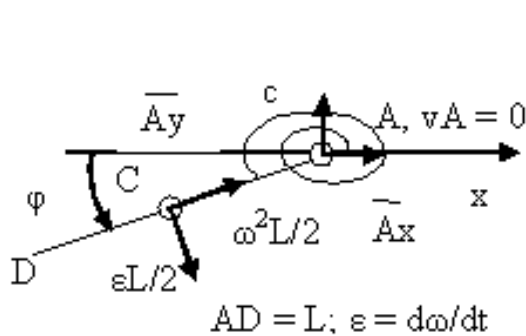
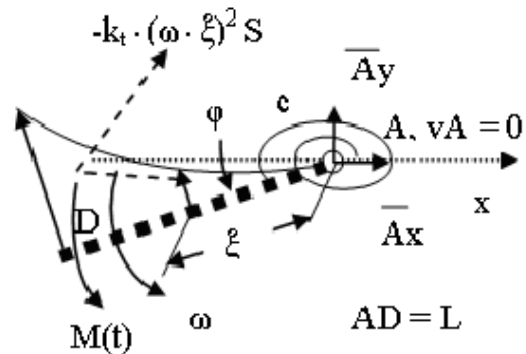


Fig. 5.2.1. Vienkāršots robota zivs modelis

Apskatītajā gadījumā korpusa masa ir ievērojami lielāka par vādekļa masu. Pieņemot, ka vādekļis ir absolūti ciets ķermenis, var noskaidrot spēkus, kuri darbojas uz vādekli, izanalizējot kustības modeli (att. 5.2.2.). Saskaņā ar šo modeli, vādekļis caur šarnīru A ir pievienots nekustīgam objektam un vādekļa kustību izsaka viena koordināte – pagrieziena leņķis φ . Sistēmas elastīgās īpašības nodrošina torsionu atspere c .



Att. 5.2.2. Vienkāršots vādekļa kustības modelis



Att. 5.2.3. Nelineārs vādekļa mijiedarbības ar apkārtējo vidi modelis

Vādekļa mijiedarbību ar apkārtējo vidi nosaka hidrodinamiskie pretestības spēki, kas ir proporcionāli kustības ātruma kvadrātam lokālā vādekļa punktā (att. 5.2.3.) [43]. Ārējo ierosmi nodrošina pieliktais moments $M(t)$.

Ņemot vērā augstāk minētos pieņēmumus, vādekļa leņķisko kustību ap šarnīru A pie ārējas harmoniskas ierosmes $M(t) = M_0 \cdot \sin(kt)$ diferenciālvienādojums var tikt pasniegts sekojoši:

$$J_A \ddot{\varphi} = M(t) - c \cdot \varphi - k_t \cdot S(t) \cdot \text{sign}(\dot{\varphi} \cdot \varphi) \cdot \int_0^L (\dot{\varphi} \cdot \xi)^2 \cdot \xi \cdot d\xi, \quad (48)$$

kur J_A – vādekļa inerces moments ap punktu A; k_t – hidrodinamiskās pretestības koeficients; $S(t)$ vādekļa mainīgā virsmas laukuma maiņas likums laikā; ξ – konkrētā vādekļa punkta koordināte; L – vādekļa garums.

Saskaņā ar vādekļa masas centra C kustību [44] var uzrakstīt sekojošu vienādojumu kā projekciju uz x asi:

$$m \left(\dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos \varphi + \ddot{\varphi} \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin \varphi \right) = A_x - k_t S(t) \cdot \sin(\varphi) \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \left(\int_0^L (\dot{\varphi} \cdot \xi)^2 \cdot d\xi \right), \quad (49)$$

kur m – vādekļa masa; A_x – spēka šarnīrā A horizontālā komponente.

Lai nodrošinātu pozitīvu robota zivs kustību (kustību x ass virzienā kā att. 5.1.2.), nepieciešams panākt negatīvu vidējo reakcijas spēku A_x šarnīrā ap kuru rotē vādekļis. Atrisinot vienādojumus (48) - (49) var atrast optimālo vadību $S(t)$, kas nodrošina maksimālo negatīvo vidējo reakcijas A_x vērtību šarnīrā. Pie tam ir ņemts vērā, ka laukums $S(t)$ var mainīt vērtību intervālā $S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max}$.

Optimālās vadības $S(t)$ meklējumos tiek izmantots Pontrjagina maksimuma princips [36;37]. Optimizācijas problēmas risināšanai kā kritērijs K ir izvirzīts maksimālā negatīvā šarnīra reakcijas A_x vērtība:

$$K = - \int_0^T A_x \cdot dt, \quad (50)$$

kur T – nepieciešamais laiks, lai pārvietotu vādekli no vienas gala pozīcijas ($\varphi_{\max}, \dot{\varphi} = 0$) uz otru gala pozīciju ($\varphi_{\min}, \dot{\varphi} = 0$). Lietojot vienādojumus (48) un (49) optimizācijas kritērijs (50) var tikt uzrakstīts sekojošā formā:

$$K = - \int_0^T \left(m \cdot \left\{ \dot{\varphi}^2 \frac{L}{2} \cos \varphi + \frac{1}{J_A} \cdot \left[M(t) - c\varphi - k_t \cdot S(t) \cdot \text{sign} \dot{\varphi} \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^4}{4} \right] \cdot \frac{L}{2} \cdot \sin \varphi \right\} + \left[k_t \cdot S(t) \cdot \sin \varphi \cdot \text{sign}(\varphi \cdot \dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \frac{L^3}{3} \right] \right) \cdot dt. \quad (51)$$

Vienādojums (51) tika pielietots optimizācijas problēmas atrisināšanai [45]. Ir parādīts, ka optimālā vadība atbilst šādiem principiem: $S(t) = S_{\min}$ – kustībai no nulles pozīcijas ($\varphi = 0$) līdz gala pozīcijai (φ_{\max} or φ_{\min}); $S(t) = S_{\max}$ – kustībai no gala pozīcijas (φ_{\max} or φ_{\min}) līdz nulles pozīcijai ($\varphi = 0$).

Izveidojam matemātisko modeli programmā Mathcad:

$$\begin{aligned}
 L &:= 0.1 & m &:= 1 & J_0 &:= m \left(\frac{L}{2}\right)^2 & B1 &:= 0.00 & B2 &:= B1 \cdot 10 \\
 M0 &:= 20 & k &:= 4 \cdot \frac{\pi}{2} & KT &:= 1000 & b &:= 5 & c &:= 20 \\
 n &:= 0..7000 & s &:= 0.000 & t_n &:= n \cdot s
 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{n+1} \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} \varphi_n + s \cdot \omega_n \\ \omega_n + \frac{s}{J_0} \cdot \left[M0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n \dots \right. \\ \left. + \left[-KT \cdot (\omega_n)^2 \right] \cdot \text{sign}(\omega_n) \cdot \frac{L^4}{4} \cdot \left[B2 \cdot (0.5 - 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \dots \right. \right. \\ \left. \left. + B1 \cdot (0.5 + 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \right] \right] \end{bmatrix}$$

kur:

L – astes garums [m];

m – astes masa [kg];

J_0 – astes inerces moments [kgm²];

$B1$ – mazākais astes efektīvais laukums;

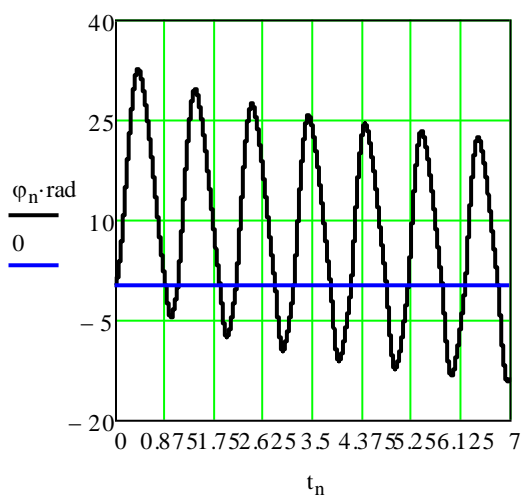
$B2$ – lielākais astes efektīvais laukums;

$M0, k, KT, b, c$ – konstantes;

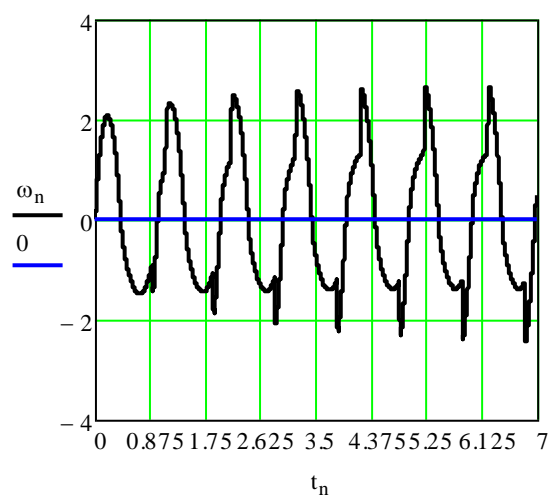
n – simulācijas soļu skaits;

s – simulācijas soļa izmērs;

Iegūstam sekojošus grafiskus rezultātus:

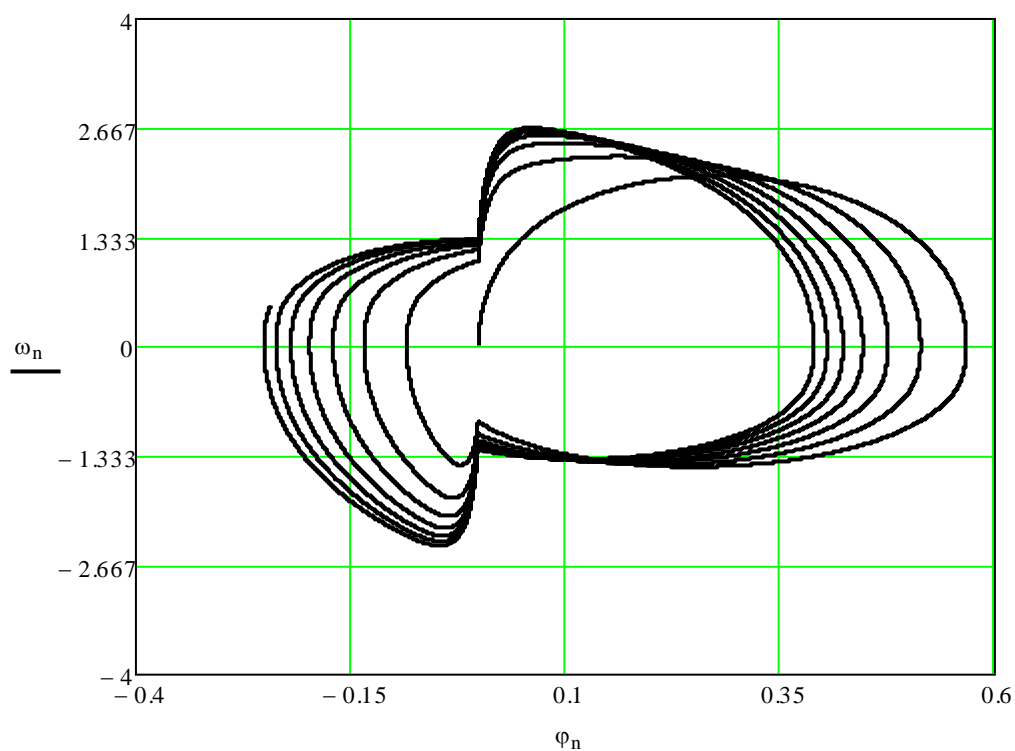


Att. 5.2.4. astes pagrieziņa leņķis



Att. 5.2.5. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums

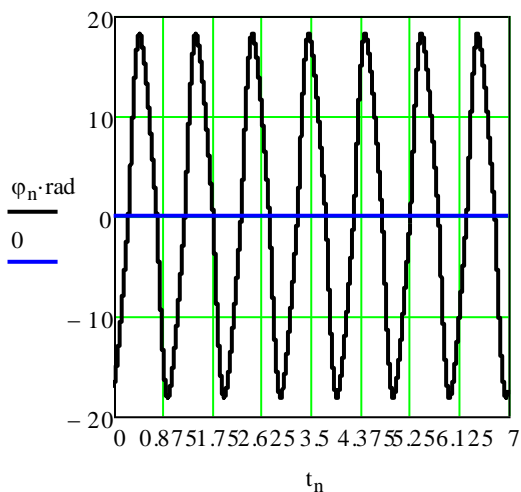
Attēlos 5.2.4. un 5.2.5. redzam astes pagrieziņa leņķi φ laikā t un astes pagrieziņa leņķisko ātrumu ω laikā t . Astes pagrieziņa leņķa vērtības uzskatāmības labad norādītas grādos, ne radiānos. Abscisu ass gradēta sekundēs. Simulācijas laiks 7 sekundes nav pietiekams, lai matemātiskais modelis šajā laikā paspētu iegūt stacionāru, stabilu darba režīmu. Tas labi redzams astes pagrieziņa leņķa φ un leņķiskā ātruma ω fāzu plaknē attēlā 5.2.6.



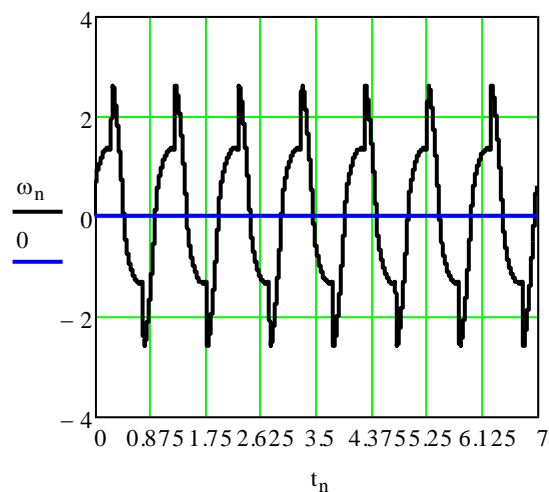
Att. 5.2.6. Astes kustība fāzu plaknē.

Matemātiskā modeļa simulācijas rezultātu pētīšanai daudz uzskatāmāki ir stacionāri režīmi, līdz ar to izmainām simulācijas sākuma nosacījumus astes leņķim no 0 uz -0.3 rad.

$$\begin{pmatrix} \varphi_0 \\ \omega_0 \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} -0.3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

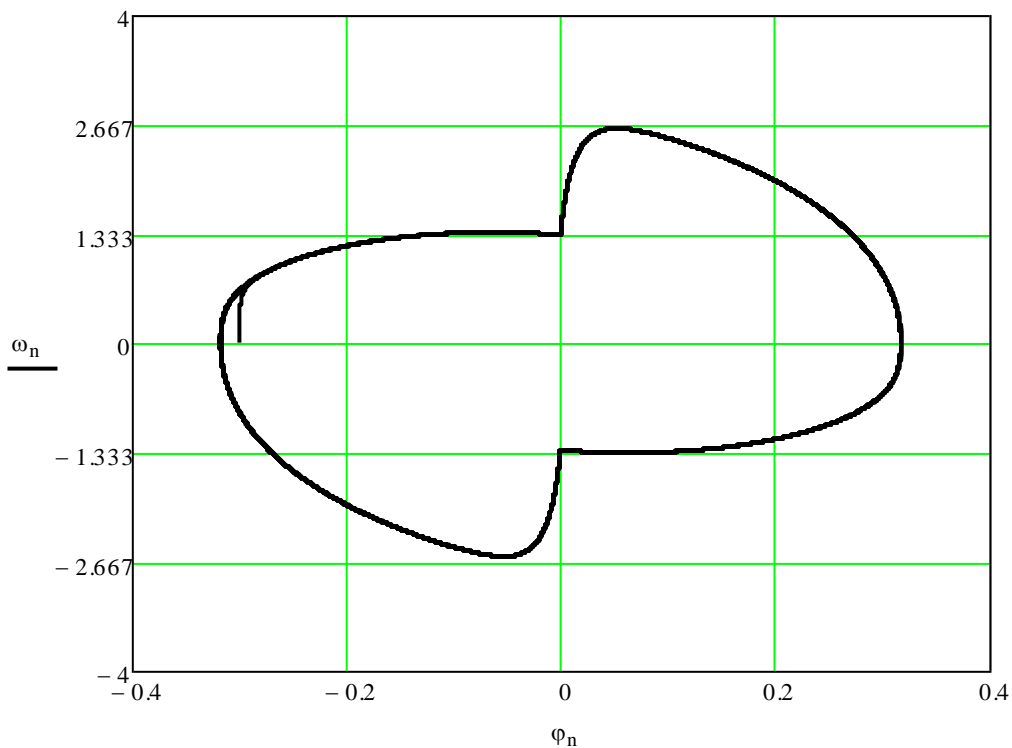


Att. 5.2.7. astes pagrieziņa leņķis



Att. 5.2.8. astes pagrieziņa leņķiskais ātrums

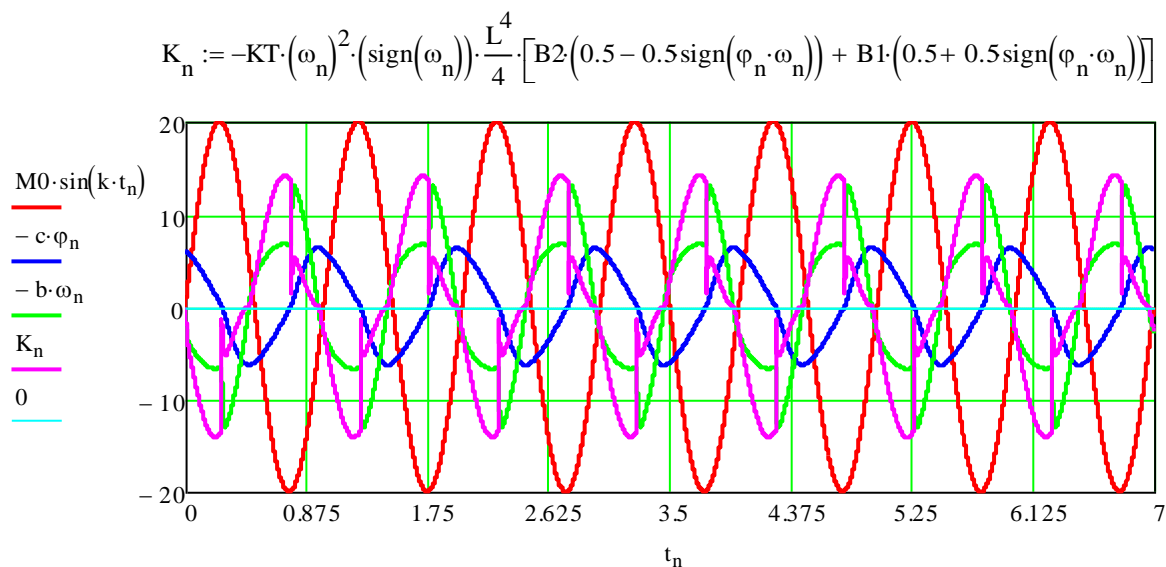
Attēlos 5.2.7. un 5.2.8. kā arī fāzu plaknē (att. 5.2.9.) redzams, ka astes kustība ir stabila.



Att. 5.2.9. Astes kustība fāzu plaknē.

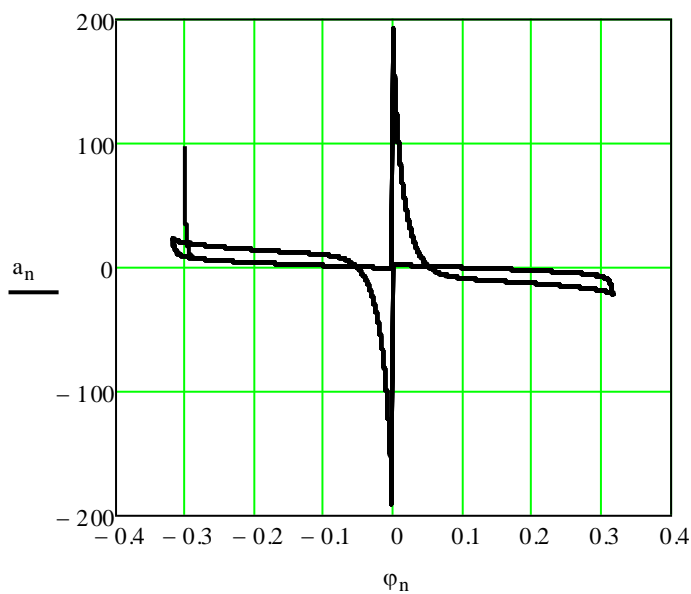
Astes kustības fāzu plaknē (att. 5.2.9.) var viegli izsekot kustībai laikā. Kustība sākas no negatīva atvērziņa (-0.3 rad), ātrums pakāpeniski pieaug un nostabilizējas pie 1.33 rad/s^2 , bet, sasniedzot astes pagrieziņa „0” vērtību, strauji pieaug līdz 2.67 rad/s^2 , un tad pakāpeniski samazinās līdz 0 rad/s^2 pozitīvā atvērziņa gala pozīcijā. Atgriešanās līdz negatīvā atvērziņa gala vērtībai notiek līdzīgi. Minētā ātruma izmaiņa skaidrojama ar laukuma maiņu, ko vada $sign$ funkcija atkarībā no pagrieziņa leņķa φ un leņķiskā ātruma ω . Līdz ar to varam secināt, ka matemātiskais modelis darbojas pareizi kā domāts.

Novērtējam ūdens pretestības radīto spēku, atsperes radīto spēku, demfera radīto spēku un pielikto harmonisko momenta spēku vienā grafikā (att. 5.2.10.). Harmoniskais vadības momenta radītais spēks diametrāli pretēji mainās ar pārējiem spēkiem, kuri tam pretojas. Uzskatāmi vērojams ūdens pretestības spēka straujš samazinājums atvērzienu galapunktos kā rezultātā strauji pieaug ātrums un palielinās demferējošā spēka radītā komponente. Astes paātrinājumi laikā un pārvietojuma fāzu plaknē grafiski attēloti attēlos 5.2.11. un 5.2.12. Paātrinājuma vērtības sasniedz augstas vērtības laukuma maiņas brīžos, kad aste atrodas tuvu „0” pozīcijai, jo šajā brīdī astei pieliktā griezes momenta vērtība ir tuvu maksimumam un strauji samazinās ūdens pretestība.



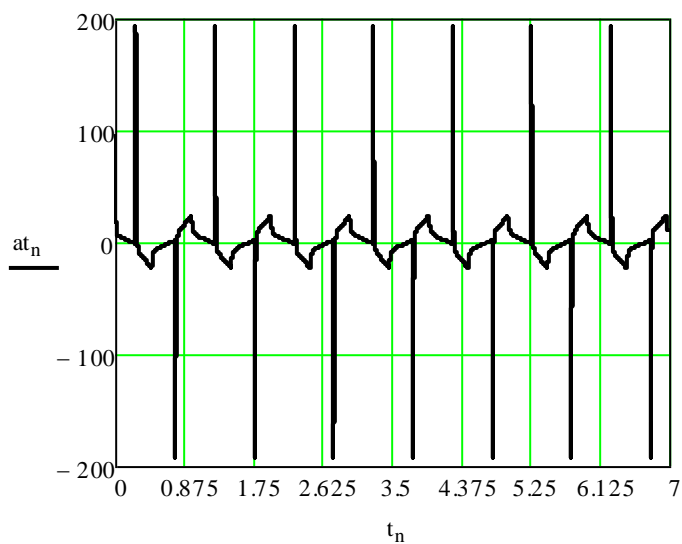
Att. 5.2.10. Astes kustību ietekmējošie spēki laikā.

$$a_n := \frac{M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[\frac{KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \left[B_2(0.5 - 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \dots + B_1(0.5 + 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \right] \right]}{J_0}$$



Att. 5.2.11. Astes pātrinājums kustības fāzu plaknē.

$$a_{t_n} := \frac{M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n - \left[\frac{KT \cdot (\omega_n)^2 \cdot (\text{sign}(\omega_n)) \cdot \frac{L^4}{4} \left[B_2(0.5 - 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \dots + B_1(0.5 + 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \right] \right]}{J_0}$$



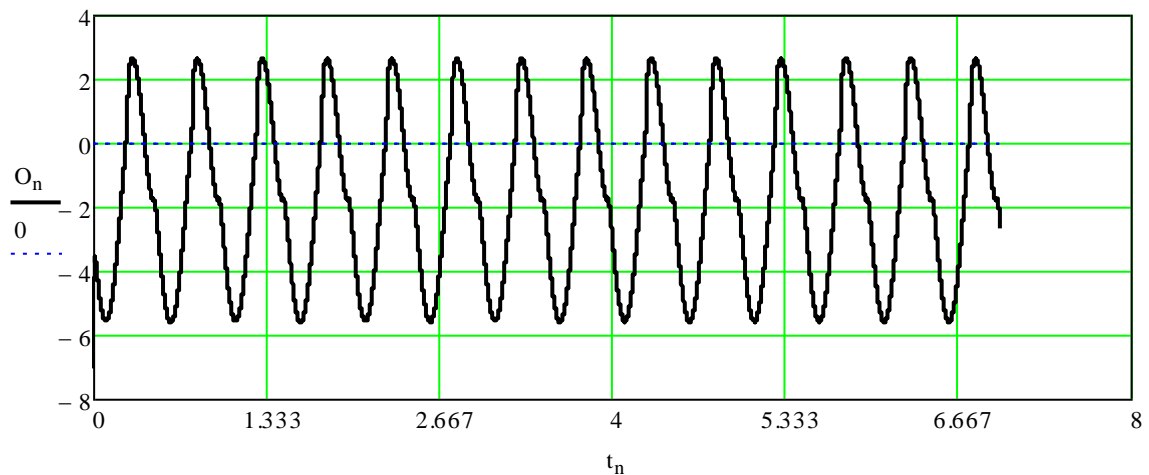
Att. 5.2.12. Astes pātrinājums laikā.

Iegūstam reakcijas spēku šarnīrā:

$$O_n := m \cdot \left[\left(\omega_n \right)^2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\varphi_n) + \left[\frac{(M_0 \cdot \sin(k \cdot t_n) - c \cdot \varphi_n - b \cdot \omega_n) + K_n \cdot \left(\frac{L}{2} \cdot \sin(\varphi_n) \right)}{J_0} \dots \right. \right. \quad (52)$$

$$\left. \left. + KT \cdot \left(\omega_n \right)^2 \cdot \left(\text{sign}(\omega_n) \right) \cdot \frac{L^3}{3} \cdot \left[B2 \cdot (0.5 - 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \dots \right] \cdot \sin(\varphi_n) \right. \right. \left. \left. + B1 \cdot (0.5 + 0.5 \text{sign}(\varphi_n \cdot \omega_n)) \right] \cdot \sin(\varphi_n) \right]$$

Un tā grafisko attēlojumu:



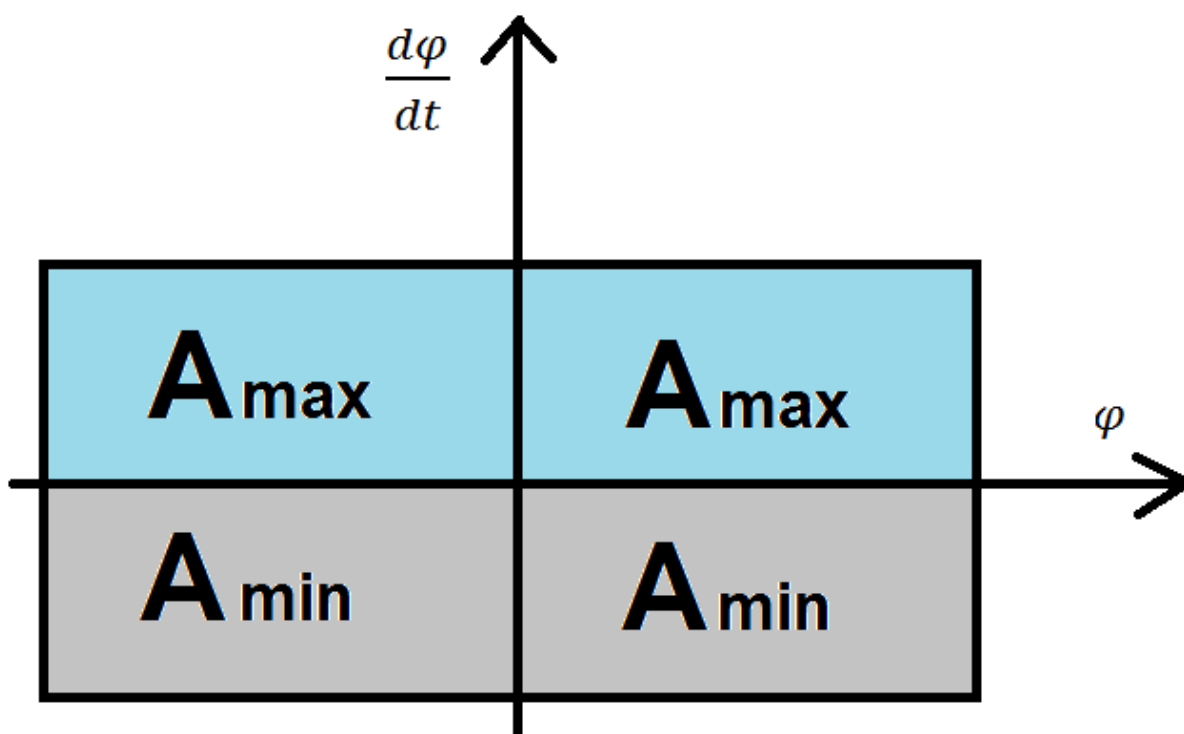
Att. 5.2.13. Astes radītā reakcija šarnīrā.

Piedāvātās optimālās vadības efektivitāti apstiprina vienādojumu (48) un (49) matemātiskās simulācijas rezultāti programmā MathCAD. Attēlā 5.2.13. redzams reakcijas O_x šarnīrā komponente laikā t . Kā redzams, grafiks ir nesimetrisks pret nulles līmeni, un dotajā gadījumā asimetrija ir negatīva. Attiecīgi arī reakcijas A_x vidējā vērtība ir negatīva. Par cik $(A_x)_m < 0$, vidējā vilkmes spēka komponente būs pozitīva, virzīta pa x asi. Tas ir nepieciešams, lai panāktu pozitīvu robota zivs kustību.

5.3. Propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu vadības paņēmieni

Nodaļā 5.2. apskatītās propulsijas iekārtas efektīvā darba laukuma A maiņa sniedz plašas iespējas arī robota vadībai, kas attiecas ne 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.

Apskatām stūrēšanas iespēju ar minēto propulsijas iekārtu. Lai būtu iespējams robotu stūrēt, nepieciešams radīt pozitīvu (vai negatīvu) vidējo reakcijas šarnīrā O vērtību pa y asi. Lai nodrošinātu šādu astes darbību, izvēlamies citu efektīvā laukuma maiņas algoritmu atkarībā no astes leņķiskā ātruma ω vērtības. Rotējot vienā virzienā efektīvais virsmas laukums A saglabājas līdz pat virziena maiņas brīdim, un tad tiek izmainīts.

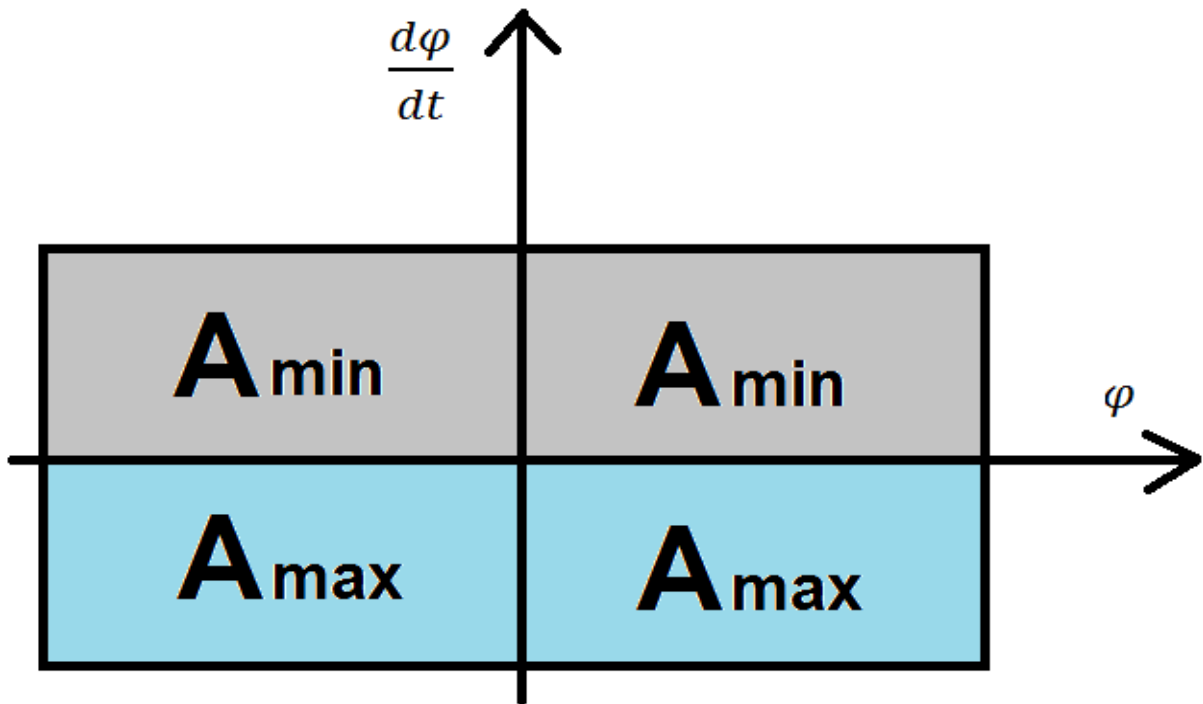


Att. 5.3.1. Astes laukuma vadības algoritms stūrēšanai

Attēlā 5.3.1. parādīts algoritms maināmā astes laukuma vadībai no A_{max} uz A_{min} . Dotajā gadījumā pozitīvā astes virziena maiņas punktā laukums A tiek ieslēgts A_{min} režīmā un netiek pārslēgts, kamēr aste nesasniedz negatīvo virziena maiņas punktu. Tad astes laukums A tiek pārslēgts uz A_{max} un tādā veidā nemainās līdz pat pozitīvajam virziena maiņas punktam.

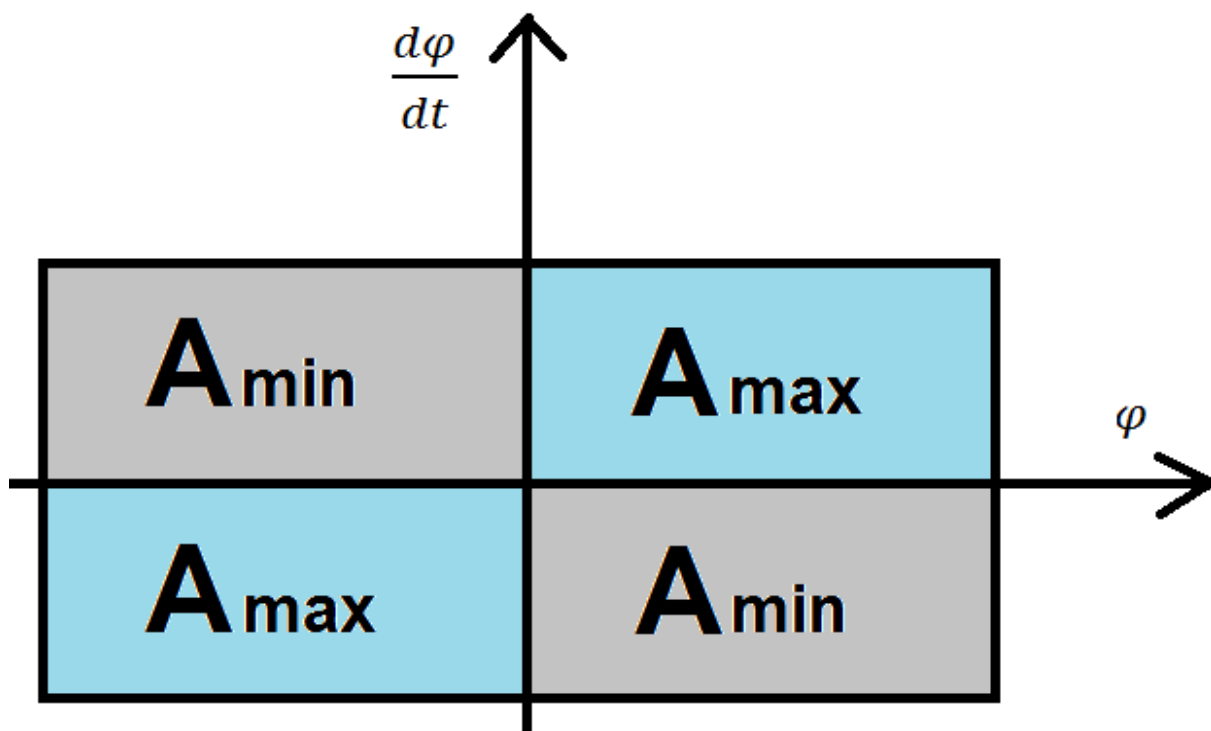
Cikls atkārtojas tik reizes, cik nepieciešams. Šādi vadot astes efektīvo darba laukumu tiek panākta negatīva reakcija šarnīrā O pa y asi (Oy), kas robotam piešķir pozitīvu griezes

momentu un pie robota kustības x ass virzienā nodrošina manevra pagriezienu pa kreisi. Līdzīgi, nomainot laukumu A vērtības (att. 5.3.2.) var iegūt pretēju efektu – pozitīvu reakciju Oy , negatīvu momentu un pagriezienu pa labi, ja robots kustas x ass virzienā.



Att. 5.3.3. Astes laukuma vadības algoritms stūrēšanai

Reversēšanai var izmantot līdzīgu metodi ar laukumu maiņu stūrēšanai, pretēji kā parādīts attēlā 4.5.1. (att. 5.3.3.).



Att. 5.3.3. Astes laukuma vadības algoritms reversēšanai

5.4. Propulsijas ar laukuma maiņu iekārtu robotu sintēze

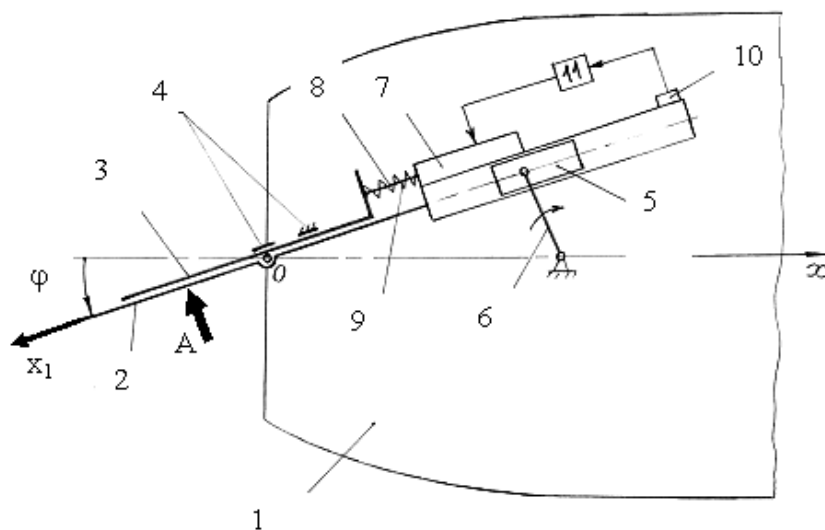
Darbojoties Eiropas Komisijas 7. Ietvarprogrammas projekta FILOSE (Robotic Fish Locomotion and Sensing) sastāvā RTU svārstību sistēmu nelineāro efektu Zinātniski pētnieciskajā laboratorijā (ZPL) tika izstrādāti vairāki vienspurās un divspurās vibrokustinātāji, kuros realizētas spuru darba laukuma cikliskas 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.

ZPL kā RTU Mehānikas institūta struktūrvienība tika izveidota 1991.gadā. Galvenais vadmotīvs laboratorijas darbībai ir nelineāro dinamisko efektu izmantošana praksē jaunu tehnoloģiju izveidē dažādās ražošanas un tehnikas nozarēs. Tādēļ fundamentālo teorētisko pētījumu rezultāti cieši saistās ar to pielietojanu reālu mašīnu un iekārtu projektēšanā. Lietišķās izstrādnes realizētas kā principiāli jauni agregāti, mašīnas, ierīces, tehnoloģisko procesu regulēšanas paņēmieni, diagnostikas procedūras un tml., kurās izmanto nelineāros efektus, atklātus teorētisko pētījumu rezultātā. Izpildāmo pētījumu raksturīga īpatnība – izstrādāto tehnisko risinājumu novitātes rūpīga pārbaude un patentēšana. Pavisam laboratorijā ir patentētas 138 tehniskās izstrādnes (30 no tām ir ieviestas praksē). Dotajā nodaļā uzmanība vērsta izgudrojumam – cieta propulsijas iekārta ar maināmu draba laukumu, izstrādātam Eiropas 7. IP projekta „Robotic Fish Locomotion and Sensing” (FILOSE) ietvaros.

5.5. Cietas propulsijas iekārtas ar laukuma maiņu sintēze

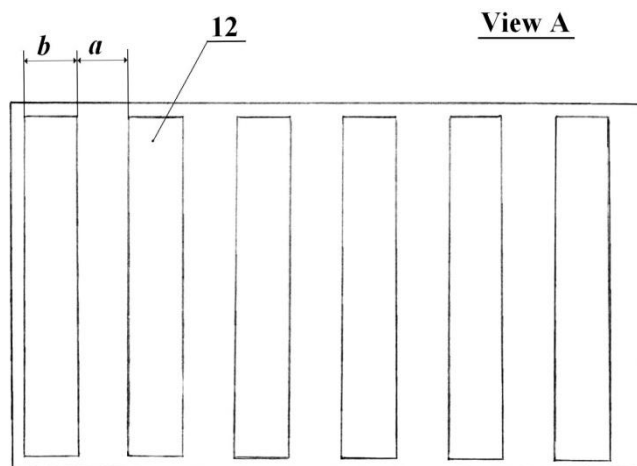
Shematisks cietas spuras tipa propulsijas iekārtas darbības princips apskatāms attēlā 5.5.1. Propulsīvā iekārta ir uzstādīta robota zivs korpusa 1 aizmugures daļā. Spura sastāv no 2 plātnēm 2 un 3, kuras var paralēli pārvietoties viena pa otru. Pie tam, plātne 3 var pārvietoties tikai relatīvi plātnei 2 pa vadīklām 4 ass x_1 virzienā. x_1 ass sakrīt ar plātnes 2 pagrieziņa leņķi φ attiecībā pret asi x , tādējādi abas plātnes 2 un 3 vienmēr atrodas paralēli viena otrai, taču relatīvi nobīdoties, maina virsmas darba laukumu S . Abas plātnes var rotēt ap vertikālu asi cauri punktam O (ar pagrieziņa leņķi φ). Plātņu 2 un 3 kustību nodrošina kloķa-klaņa tipa pievads, kas sastāv no plātnes 2 pagarinājuma (klanis), pa kuru pārvietojas slīdnis 5, un kloķa 6. Kloķa piedziņu var nodrošināt ar elektromotoru vai jebkādu citu mehāniskās enerģijas avotu. Tas šajā attēlā nav parādīts. Plātnes 3 relatīvo virzes kustību nodrošina mehatroniska

sistēma: elektromagnēts 7 ar stieni 8, kas cieti piestiprināts plātnei 3; atspere 9; vibrāciju pārveidotājs 10; vadības bloks 11, kurš formē vadības signālus.



Att. 5.5.1. Cietas spuras tipa propulsijas iekārta

Propulsijas iekārtas darba virsmas, kura saskaras ar darba šķidrumu, dizaina variants parādīts attēlā 5.5.2. (skats A attēlā 4.1.). Abās plātnēs 2 un 3 ir izveidotas spraugas 12, pie tam attālums starp spraugām a ir vienāds ar spraugas platumu b . Atkarībā no relatīvā pārvietojuma x_1 , spraugas 12 var būt viena otrai pretī vai pamīšus. Ja spraugas 12 sakrīt, propulsijas iekārtas darba virsma ir minimāla S_{min} . Turpretī, ja spraugas 12 atrodas pamīšus, tad propulsijas iekārtas darba virsma ir maksimāla S_{max} . Pie tam propulsijas iekārtas darba virsmas laukumu S ir iespējams iegūt ar jebkādu vērtību starp S_{min} un S_{max} vienkārši relatīvi pārbīdot plātņi 3 pret plātņi 2.



Att. 5.5.2. Propulsijas iekārtas darba virsmas dizaina variants

Atsaucoties uz cietas propulsijas iekārtas ar maināmu darba virsmas laukumu matemātiskā modeļa optimizācijas uzdevuma (vienādojums (51)) atrisinājumu, parādīts, ka optimālā vadība atbilst šādiem principiem: $S(t) = S_{\min}$ – kustībai no nulles pozīcijas ($\varphi = 0$) līdz gala pozīcijai (φ_{\max} or φ_{\min}); $S(t) = S_{\max}$ – kustībai no gala pozīcijas (φ_{\max} or φ_{\min}) līdz nulles pozīcijai ($\varphi = 0$).

Piedāvātā propulsijas iekārta vilces spēka radīšanai izmanto asti, kas sastāv no 2 plātnēm 2 un 3, eņģes, kas savieno asti ar robota korpusu, un mehānisku astes vibrāciju ierosinātāju. Tādējādi, lai nodrošinātu efektīvu pievadītās jaudas izmantojumu robota kustībā uz priekšu pa x asi, tajos brīžos, kad plātņu 2 un 3 pagrieziens iet caur leņķa $\varphi = 0$ vērtību, vadības bloks 11 ģenerē vadības signālu elektromagnēta 7 aktivizēšanai. Elektromagnēts pievelk stieni 8 kopā ar plātņi 3 saspiežot atsperi 9. Rezultātā plātnes tiek novietotas viena pret otru tā, lai spraugas 12 sakristu izveidojot S_{\min} darba laukuma vērtību. Pretēja darbība notiek plātņu rotācijas virziena maiņas brīdī, kad vadības bloks 11 atslēdz vadības signālu no elektromagnēta 7, un atsperē atspiež plātņi 3 sākotnējā stāvoklī pie tam novietojot spraugas 12 pamīšus. Šajā brīdī astes darba laukuma vērtība mainās uz S_{\max} .

Šādi vadot propulsijas iekārtu ir iespējams nodrošināt maksimālo efektīvās darba virsmas laukumu tajos kustības brīžos, kad tiek veidots lietderīgais vilces spēks (samazinot astes pagriezienu leņķi no $\pm\varphi_{\max}$ līdz 0), un minimālo efektīvās darba virsmas laukumu tajos kustības brīžos, kad uz asti darbojas nelietderīgie ūdens pretestības spēki (palielinot astes pagriezienu leņķi no 0 līdz $\pm\varphi_{\max}$). Pateicoties šādam vadības algoritmam piedāvātā metode ļauj samazināt enerģijas zudumus un padarīt iekārtu efektīvāku. Teorētiskos pētījumus apstiprina eksperimenti ar robota zivs modeli.

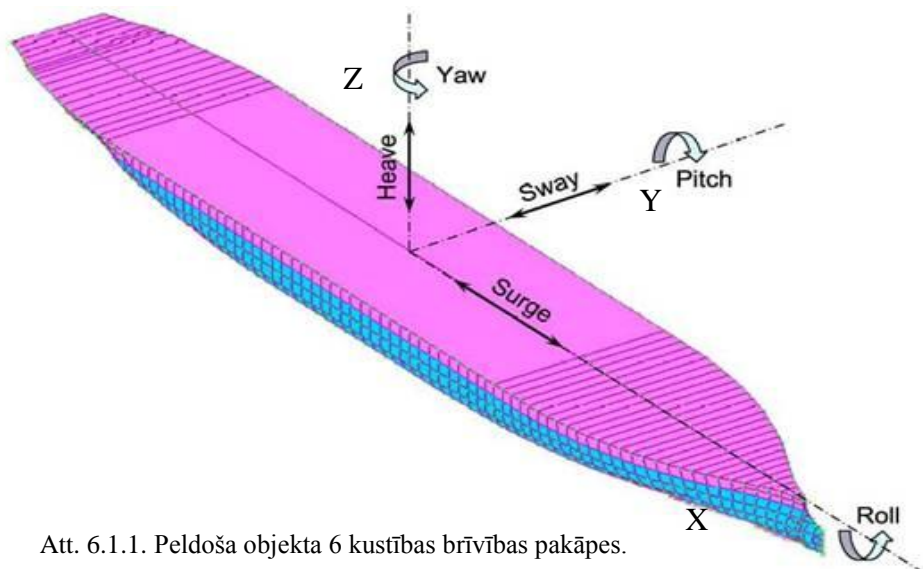
Šī metode izstrādāta Eiropas Komisijas 7. Ietvarprogrammas projekta FILOSE (Robotic Fish Locomotion and Sensing), projekta numurs 231495, ietvaros.

6. PELDOŠA OBJEKTA MODELIS AR APKĀRTĒJĀS VIDES IETEKMI.

6.1. Peldoša objekta kustības diferenciālvienādojumi

Jebkurš objekts ir pakļauts apkārtējās vides iedarbībai. Līdzīgi tas ir ar peldošiem objektiem. Pie apkārtējās vides ietekmes pieskaitāmi tādi efekti kā vides (vižu, ja objekts atrodas uz vides robežas ar citu/citām vidēm) mehāniskā iedarbība, ķīmiskā, termiskā, starojuma iedarbība ir tikai daži no iedarbības veidiem, ar ko jāsaskaras objektiem brīvā vidē. Runājot par objektu dinamiku, varam atņemt visas citas iedarbības izņemot mehānisko. Mehāniskā ietekme tieši nosaka objekta uzvedību laikā, tā pozīciju, kustības likumus, vadāmību.

Lai precīzi varētu raksturot un paredzēt peldoša objekta kustību laikā, nepieciešams ieviest 3 virzienu objekta pārvietojumu un rotāciju ap šīm asīm, kas rezultātā piešķir objektam 6 brīvības pakāpes (att. 6.1.1.). Kustības definēšanai ir ērti izmantot vispārpieņemtus objekta kustības apzīmējumus, kuri tiek plaši pielietoti aerodinamikā [46] un kuģu būvē [47]. Objekta pozīcija tiek raksturota ar Eilera leņķiem Taita-Briana izpildījumā [48]. Aerodinamika ir zinātne, kas pēta gaisa kuģu (objektu) orientāciju un vadību telpā trijās dimensijās. Trīs kritiskie aerodinamikas parametri ir rotāciju leņķi trijās dimensijās ap objekta masas centru, kas zināmi kā „pitch”, „roll” un „yaw”. Galvenā aerodinamikas problēma ir objekta trīs minēto leņķu nodrošināšana jeb objekta pozicionēšana ap tā masas centru ar dažādu vadības sistēmu palīdzību. Vadības sistēmas tipiski sastāv no dažādiem aktuatoriem, kas var radīt dažādu virzienu spēkus uz objekta korpusu, tādā veidā nodrošinot nepieciešamos spēka momentus rotācijai ap objekta aerodinamisko centru [49]



Att. 6.1.1. Peldoša objekta 6 kustības brīvības pakāpes.

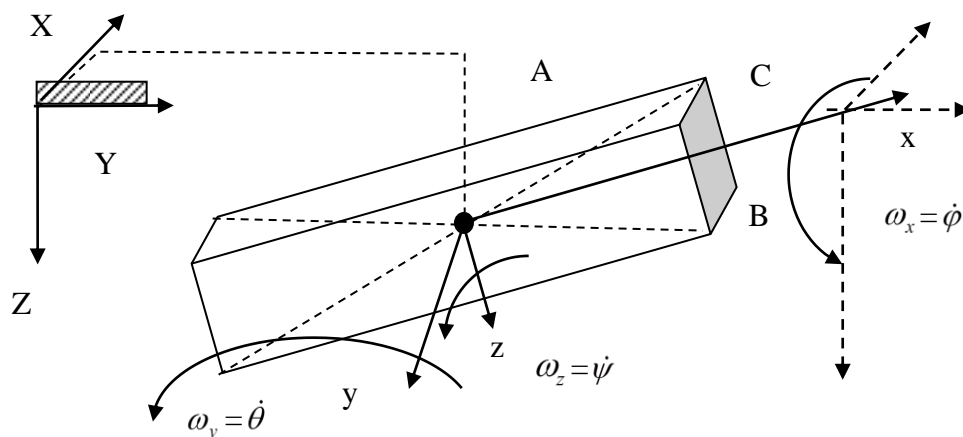
Kuģu būve ir zinātne, kas objekta kustības raksturošanai izmanto 6 brīvības pakāpes – jau minētos pagrieziena leņķus „pitch”, „roll” un „yaw”, kā arī translācijas kustību trīs dimensiju telpā. Translācijas kustības komponentes pieņemts saukt par „heave” (lineārā vertikālā augšup-lejup kustība), „sway” (lineārā laterālā kustība sānis) un „surge” (lineārā garenvirziena kustība uz priekšu un atpakaļ) (att. 6.1.1.).

Peldoša objekta dinamikas pētīšanai norobežosimies ar sekojošiem apkārtējās vides iedarbības spēkiem:

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

Apskatīsim katru no minētajiem spēkiem atsevišķi. Sāksim ar objekta matemātiskā modeļa izveidi.

Ņemot vērā sistēmas komplicitāti un iesaistīto parametru kvantitāti, novienkāršosim peldošā objekta fizisko formu līdz homogēnam paralēlskaldnim (att. 6.1.2.).



Att. 6.1.1. Peldoša objekta matemātiskais modelis ar x , y un z asīm, un rotācijas leņķiem ω ap asīm x , y un z .

Par cik objekta forma ir simetriska, un materiāls ir pieņemts par homogēnu, objekta aerodinamiskais centrs sakrīt ar objekta ģeometrisko centru, kā arī ar tā masas centru, un var tikt izteikts sekojošā masas centra kustības formā (53), savukārt rotācija ap masas centru var tikt izteikta ar kinētiskā momenta izmaiņas teorēmu (54) [49]:

$$m \cdot \bar{a}_c = \sum \bar{F}_k^{(e)}; \quad (53)$$

$$\frac{d\bar{L}_c}{dt} = \sum \bar{M}_k^{(e)}, \quad (54)$$

kur:

m – objekta masa;

\bar{a}_c – masas centra paātrinājums;

$\sum \bar{F}_k^{(e)}$ – apkārtējās vides iedarbības spēku summa, - gravitāte, izspiestā ūdens iedarbība (Arhimēda cēlējspēks), gaisa (vēja) un ūdens (straumes un viļņi) iedarbība, propulsijas ietekme u.c.;

\bar{L}_c – objekta kinētiskais moments pret masas centru C ;

$\frac{d\bar{L}_c}{dt}$ – kinētiskā momenta atvasinājums laika vienībā t ;

$\sum \bar{M}_k^{(e)}$ – ārējo spēku momentu pret objekta masas centru ģeometriskā summa

Objekta kinētiskais moments pret masas centru C (55):

$$\bar{L}_c = [J_c] \cdot \bar{\omega}, \quad (55)$$

kur:

$[J_c]$ – objekta masas inerces tenzors pret masas centru C ;

$\bar{\omega}$ – objekta leņķiskā ātruma vektors.

Attiecīgi,

$$[J_c] = \begin{bmatrix} J_x & -J_{xy} & -J_{xz} \\ -J_{xy} & J_y & -J_{yz} \\ -J_{xz} & -J_{yz} & J_z \end{bmatrix}, \quad (56)$$

kur:

J_x, J_y, J_z – aksiālie inerces momenti;

J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} – centrālās inerces momenti.

Izvēloties asis x , y un z kā inerces pamatasi, centrālās inerces momenti vienādi ar 0.

($J_{xy} = 0, J_{xz} = 0, J_{yz} = 0$) un:

$$[J_c] = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}. \quad (57)$$

Attiecīgi leņķisko ātrumu $\bar{\omega}$ var izteikt ar komponentēm $\omega_x, \omega_y, \omega_z$:

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (58)$$

Nelielu kuģa svārstību (angliski - pitching, rolling) gadījumā komponentes ir vienlīdzīgas ar attiecīgo leņķu pirmajiem atvasinājumiem (skat. 6.1.2. att.):

$$\omega_x = \dot{\varphi}, \omega_y = \dot{\theta}, \omega_z = \dot{\psi},$$

kur φ, θ, ψ – attiecīgi pagrieziena leņķi ap x, y un z asīm. Tātad,

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (59)$$

un

$$\bar{L}_c = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x \cdot \omega_x \\ J_y \cdot \omega_y \\ J_z \cdot \omega_z \end{bmatrix}. \quad (60)$$

Kinētiskā momenta \bar{L}_c (54), (60) atvasinājumu atrodam kā atvasinājumu pret korpusa asīm x, y, z, pēc tam papildus, kā tā rotācijā ar leņķisko ātrumu $\bar{\omega}$ sekojoši:

$$\frac{d\bar{L}_c}{dt} = \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} J_x \cdot \omega_x \\ J_y \cdot \omega_y \\ J_z \cdot \omega_z \end{Bmatrix} + \bar{\omega} \times \bar{L}_c. \quad (61)$$

Tā kā aksiālie inerces momenti J_x, J_y, J_z ir laikā nemainīgi, tad izteiksme (61) pārveidojās šādi:

$$\frac{d\bar{L}_c}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} J_x \cdot \varepsilon_x \\ J_y \cdot \varepsilon_y \\ J_z \cdot \varepsilon_z \end{array} \right\} + \left| \begin{array}{ccc} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ J_x \cdot \omega_x & J_y \cdot \omega_y & J_z \cdot \omega_z \end{array} \right|, \quad (62)$$

kur $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – leņķiskie paātrinājumi ap attiecībām x, y un z asīm, kas saistītas ar kuģa korpusu.

Tādā veidā no izteiksmēm (53) un (54) iegūstam šādu sešu korpusa diferenciālvienādojumu kreisās puses (labās puses tiks atrastas turpmāk, izejot no spēku redukcijas):

$$m \cdot \ddot{X}_c = \sum F_{kx}^{(e)}; \quad (63)$$

$$m \cdot \ddot{Y}_c = \sum F_{ky}^{(e)};$$

$$m \cdot \ddot{Z}_c = \sum F_{kz}^{(e)};$$

$$J_x \cdot \ddot{\varphi} + (J_z - J_y) \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} = \sum M_{kx}^{(e)}, \quad (64)$$

$$J_y \cdot \ddot{\theta} + (J_x - J_z) \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\psi} = \sum M_{ky}^{(e)},$$

$$J_z \cdot \ddot{\psi} + (J_y - J_x) \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\theta} = \sum M_{kz}^{(e)},$$

Šeit indeksi norāda asis, uz kurām projicējas spēki vai to radītie momenti. Spēku pirmie un otrie atvasinājumi pēc laika ir apzīmēti attiecīgi ar vienu vai diviem punktiem (arī att. 6.1.2.). Svarīgi ir pieminēt, ka masas centra kustība ir aprakstīta absolūtajā koordinātu sistēmā, bet rotācija ap masas centru – relatīvajā pārejas koordinātu sistēmā.

6.2. Spēku redukcija uz masas centru

6.2.1. Vēja iedarbības spēku redukcija

Sadalīsim spēkus divās daļās – laterālie spēki, kas darbojas uz 2 objekta virsmām: sānu virsma $A1$ un gala virsma $B1$.

Spēki ir atkarīgi no relatīvā ātruma projekcijas (uz virsmas normāli) kvadrāta. Šādā veidā iegūstam sekojošo vēja spēka momenta projekciju pret vertikālo Z asi.

$$NA1_x = -k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot (\dot{X} \cdot \sin(\alpha + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(\alpha + \psi) + Vv \cdot \sin(\psi + \beta))^2 \cdot \sin(\alpha + \psi) \quad (65)$$

$$NB1_x = -k2 \cdot B2 \cdot C2 \cdot (\dot{X} \cdot \cos(\alpha + \psi) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha + \psi) + Vv \cdot \cos(\psi + \beta))^2 \cdot \cos(\alpha + \psi)$$

$$NA1_y = k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot (\dot{X} \cdot \sin(\alpha + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(\alpha + \psi) + Vv \cdot \sin(\psi + \beta))^2 \cdot \cos(\alpha + \psi)$$

$$NB1_y = -k2 \cdot B2 \cdot C2 \cdot (\dot{X} \cdot \cos(\alpha + \psi) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha + \psi) + Vv \cdot \cos(\psi + \beta))^2 \cdot \sin(\alpha + \psi)$$

$$Mv_z = -k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot (\dot{X} \cdot \sin(\alpha + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(\alpha + \psi) + Vv \cdot \sin(\psi + \beta))^2 \cdot e1,$$

kur:

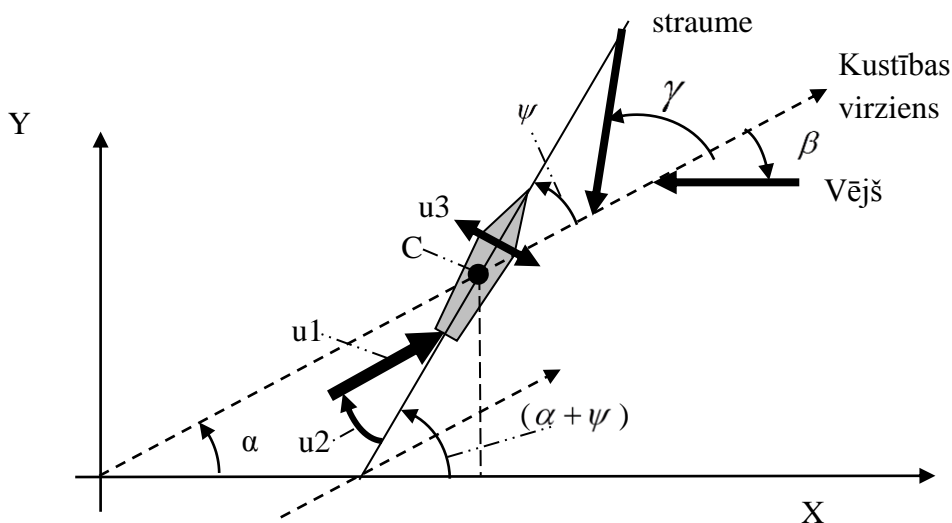
$k1, k2$ – vides pretestības spēka koeficienti,

$C1, C2$ – vēja iedarbības laukuma augstums;

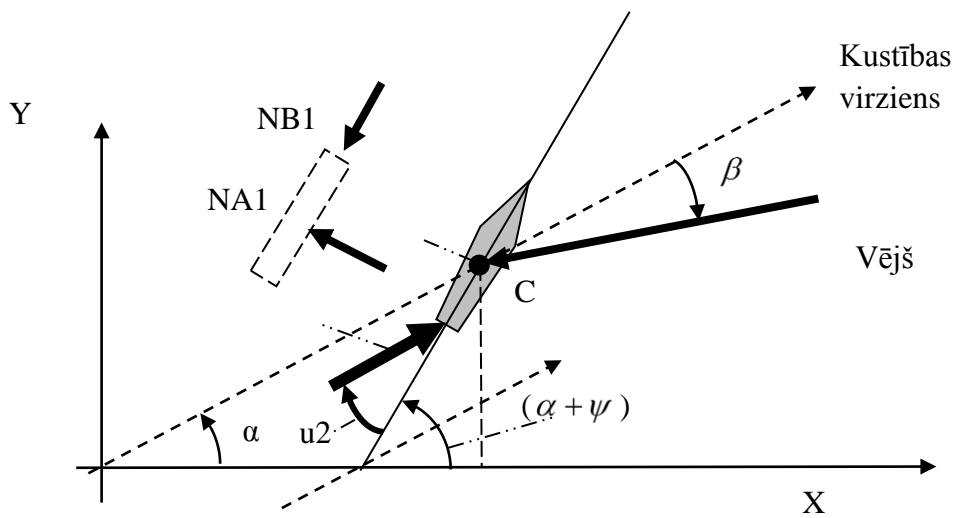
Vv – absolūtais vēja ātrums;

$e1$ – vēja spēka plecs pret masas centru C ;

α, β, γ un ψ - darbības leņķi (skatīt att. 6.2.1. un 6.2.2.).



Att.6.2.1. Objekta kustības virziens, straumes un vēja virzieni, propulsijas vadības $U1, U2$ un $U3$.



Att. 6.2.2. Vēja spēka iedarbība uz objekta laterālo virsmu (vidējais garums A1) un gala virsmu (vid. Garums B1).

6.2.2. Ūdens straumes iedarbības spēku redukcija

Tāpat kā iepriekš (gadījumā ar vēju), sadalīsim spēku divās komponentēs: laterālie spēki, kuri iedarbojas uz 2 virsmām: sānu virsma ar garumu $A3$, un gala virsma ar garumu $B4$. Spēki ir atkarīgi no relatīvā ātruma projekcijas (uz virsmas normāli) kvadrāta. Iegūstam sekojošus vienādojumus:

$$NA3_x = -k3 \cdot A3 \cdot C3 \cdot \sin(a + \psi) \cdot (\dot{X} \cdot \sin(a + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(a + \psi) + Vs \cdot \sin(\psi - \gamma))^2 \quad (66)$$

$$NB4_x = -k4 \cdot B4 \cdot C4 \cdot \cos(a + \psi) \cdot (\dot{X} \cdot \cos(a + \psi) - \dot{Y} \cdot \sin(a + \psi) + Vs \cdot \sin(\psi - \gamma))^2$$

$$NA3_y = -k3 \cdot A3 \cdot C3 \cdot \cos(a + \psi) \cdot (\dot{X} \cdot \sin(a + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(a + \psi) + Vs \cdot \sin(\psi - \gamma))^2$$

$$NB4_y = -k4 \cdot B4 \cdot C4 \cdot \sin(a + \psi) \cdot (\dot{X} \cdot \sin(a + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(a + \psi) + Vs \cdot \cos(\psi - \gamma))^2$$

$$Ms_z = k3 \cdot A3 \cdot C3 \cdot l \cdot (\dot{X} \cdot \sin(\alpha + \psi) - \dot{Y} \cdot \cos(\alpha + \psi) + Vs \cdot \sin(\psi - \gamma))^2 \cdot e1,$$

kur:

$k3, k4$ – vides pretestības spēka koeficienti,

$C3, C4$ – straumes iedarbības laukuma augstums;

Vs – absolūtais straumes ātrums;

$e1$ – spēka plecs pret masas centru C ;

α, β, γ un ψ - darbības leņķi (skatīt att. 6.2.1. un 6.2.2.).

Papildus jāņem vērā vides viskozā iedarbība uz objekta sānu malām kā viskozās slīdes iedarbība, kas atkarīga no relatīvā slīdes ātruma pirmajā pakāpē. Iegūstam vienādojumus:

$$NA0_x = 2 \cdot k0 \cdot (-1) \cdot [\cos(\alpha + \psi) \cdot (\dot{X} \cdot \cos(\alpha + \psi) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha + \psi) + Vs \cdot \cos(\psi - \gamma))] \quad (67)$$

$$NA0_y = 2 \cdot k0 \cdot (-1) \cdot [\cos(\alpha + \psi) \cdot (\dot{X} \cdot \cos(\alpha + \psi) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha + \psi) + Vs \cdot \cos(\psi - \gamma))]$$

kur:

$k0$ – konstante

„2” – pretējās objekta puses

γ - konkrētās kustības virziens

6.2.3. Viļņu iedarbības spēku redukcija

Viļņu spēka un iedarbības noteikšanai pieņemam sekojošus noteikumus:

- Viļņi izplatās akurāti vēja virzienā ar nobīdes leņķi;
- Viļņu iedarbība tiek ņemta vērā tikai no laterālās puses;
- Viļņu kustības ātrums $V0$ nav lielāks par vēja ātrumu Vv ;
- Periodiskais viļņa garums $L0$ ir dots, vai tiek noteikts no perioda T un ātruma $V0$;
- Viļņu iedarbības spēks ir atkarīgs no objekta masas m vai svara mg ;
- Viļņa augstums (amplitūda) ir dots;
- Konstante $k00$ ir jānosaka eksperimentāli.

Tādā gadījumā spēka komponentes x un y asu virzienā ir (68):

$$R_{xvil} = k00 \cdot (-1) \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \left[\left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t \cdot [\dot{X} \cdot (\cos(\alpha - \beta) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha - \beta)) + V0]}{L0} \right] \right] \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] \quad (68)$$

$$R_{yvil} = k00 \cdot (-1) \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \left[\left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t \cdot [\dot{X} \cdot (\cos(\alpha - \beta) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha - \beta)) + V0]}{L0} \right] \right] \cdot \sin(\alpha - \beta) \right]$$

Attiecīgi, spēki Z ass virzienā ietver:

- Gravitāte mg ;
- Arhimēda cēlējspēks elastīgas atsperes veidā $cz \cdot Zn$;
- Viskoza pretestība $-(k01 \cdot vZ)$;
- Uzspiesto svārstību komponente kā viļņošanās darbības iespaids ar amplitūdu a .

Iegūstam sekojošu sakarību:

$$Rz = m \cdot g - cz \cdot Z - k01 \cdot \dot{Z} + (-a \cdot cz) \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t \cdot [\dot{X} \cdot (\cos(\alpha - \beta) + \dot{Y} \cdot \sin(\alpha - \beta)) + V0]}{L0} \right] \quad (69)$$

6.2.4. Objekta leņķiskā kustība

Objekta leņķiskā kustība (svārstības ap C_{xx} un C_y asīm kā vienādojumos (64)) ir maza salīdzinot ar pagriešanās leņķi ap vertikālo C_z asi. Var pieņemt, ka kustības ir savienotas sekojošā rimstošu svārstību formā:

$$\omega_x = \omega_x + \frac{s}{J_y} \cdot [\omega_y \cdot \omega_z \cdot (J_y - J_z) - cT1 \cdot \varphi - bT1 \cdot \omega_x] \quad ; \quad (70)$$

$$\omega_y = \omega_y + \frac{s}{J_y} \cdot [\omega_x \cdot \omega_z \cdot (J_z - J_x) - cT2 \cdot \theta - bT2 \cdot \omega_y] \quad ' ,$$

Kur $cT1$, $cT2$, $bT1$ un $bT2$ – konstantes.

Objekta leņķiskā kustība ap asi c_z ir viena no galvenajām kustībām, jo tā nosaka pārvietojuma un stūrēšanas virzienus (skatīt (64)):

$$J_z \cdot \ddot{\psi} + (J_y - J_x) \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{\theta} = \sum M_{kz}^{(e)},$$

Kopsalikumā (71) redzami visi augstāk minētie spēki kā arī 3 vadības (skatīt zemāk) ar ekscentritātēm jeb spēku pielikšanas pleciem $e1$, $e2$, $e3$.

$$\begin{aligned} \omega_{z_{z+1}} = \omega_{z_n} + \frac{s}{J_z} \cdot [& \quad \leftarrow \quad] \quad (71) \\ U3 \left(\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n) \right) \cdot e3 + U1 \cdot \sin \left[(-1) \cdot U20 \cdot \text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n) \right] \cdot e2 - (bT3 \cdot \omega_{z_n}) + \omega_{x_n} \cdot \omega_{y_n} \cdot (J_x - J_y) & + \\ k00 \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \cdot \left[\left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t_n \cdot \left[(vX_n \cdot \cos(\alpha - \beta) + vY_n \cdot \sin(\alpha - \beta)) + V0 \right]}{L0} \right] \right] \cdot \sin(\psi_n + \beta) \right] \cdot e4 & + \\ k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot 1 \cdot \left(vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \sin(\psi_n + \beta) \right)^2 \cdot e1 \cdot 1 \cdot \left(\text{sign}(\sin(\psi_n + \beta)) \right) & + \\ k3 \cdot A3 \cdot C3 \cdot 1 \cdot \left(vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \sin(\psi_n - \gamma) \right)^2 \cdot (e1 \cdot 1 \cdot \text{sign}(\sin(\psi_n - \gamma))) &] \end{aligned}$$

6.2.5. Objekta propulsijas vadība

Objekta propulsija nodrošina 3 vadības:

- $U1$ – dzenskrūve ar konstantu spēku (skatīt (72), (73));
- $U20$ – konstants stūrēšanas leņķis (pa labi vai pa kreisi), ko vada novirze no kursa ar signatūras funkciju;
- $U3$ – pietūrēšanas iekārta objekta priekšpusē. Arī ar signatūras funkcijas vadību (71), (72).

$$(U1, U20)x = U1 \cdot \cos[\alpha + \psi - (-1) \cdot U20 \cdot \text{sign}(X \cdot \tan(\alpha) - Y)]; \quad ;$$

$$U3x = -U3 \cdot (\text{sign}(X \cdot \tan(\alpha) - Y)) \cdot \sin(\alpha + \psi); \quad (72)$$

$$(U1, U20)y = U1 \cdot \sin[\alpha + \psi - (-1) \cdot U20 \cdot \text{sign}(X \cdot \tan(\alpha) - Y)];$$

$$U3y = U3 \cdot (\text{sign}(X \cdot \tan(\alpha) - Y)) \cdot \cos(\alpha + \psi);$$

6.3. Peldoša objekta kustības datormodelēšana

Izveidojam aprēķinu modeli programmā MathCad.

$$\begin{pmatrix} X_{n+1} \\ vX_{n+1} \\ Y_{n+1} \\ vY_{n+1} \\ Z_{n+1} \\ vZ_{n+1} \\ \varphi_{n+1} \\ \omega x_{n+1} \\ \theta_{n+1} \\ \omega y_{n+1} \\ \psi_{n+1} \\ \omega z_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_n + s \cdot vX_n \\ vX_n + \frac{s}{m} \cdot \left[U1 \cdot \cos[\alpha + \psi_n - U2 \cdot [(1) \cdot (\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n)) - K \cdot \text{sign}(\psi_n)]] - U3 \cdot (\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n)) \cdot \sin(\alpha + \psi_n) \right] \dots \\ + \left[-k00 \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \cdot \left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t_n \cdot [vX_n \cdot (\cos(\alpha - \beta + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha - \beta + \psi_n)) + V0]}{L0} \right] \right] \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] \dots \\ + k0(-1) \cdot (A2 \cdot B2 + 2 \cdot A2 \cdot C2) \cdot \left[\cos(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \cos(\psi_n - \gamma)) \right] \dots \\ + \left[-k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot \sin(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \sin(\psi_n + \beta)) \right]^2 \dots \\ + \left[-k2 \cdot B1 \cdot C1 \cdot \cos(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \cos(\psi_n + \beta)) \right]^2 \dots \\ + \left[-k3 \cdot A2 \cdot C2 \cdot \sin(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \sin(\psi_n - \gamma)) \right]^2 \dots \\ + \left[-k4 \cdot B2 \cdot C2 \cdot \cos(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \cos(\psi_n - \gamma)) \right]^2 \right] \\ Y_n + s \cdot vY_n \\ vY_n + \frac{s}{m} \cdot \left[U1 \cdot \sin[\alpha + \psi_n - U2 \cdot [(1) \cdot (\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n))] - K \cdot \text{sign}(\psi_n)] + U3 \cdot (\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n)) \cdot \cos(\alpha + \psi_n) \right] \dots \\ + \left[-k00 \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \cdot \left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t_n \cdot [vX_n \cdot (\cos(\alpha - \beta + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha - \beta + \psi_n)) + V0]}{L0} \right] \right] \cdot \sin(\alpha - \beta) \right] \dots \\ + \left[-k0(A2 \cdot B2 + 2 \cdot A2 \cdot C2) \cdot \left[\sin(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \cos(\psi_n - \gamma)) \right] \right] \dots \\ + \left[k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot \cos(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \sin(\psi_n + \beta)) \right]^2 \dots \\ + \left[-k2 \cdot B1 \cdot C1 \cdot \sin(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) + vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \cos(\psi_n + \beta)) \right]^2 \dots \\ + \left[k3 \cdot A2 \cdot C2 \cdot \cos(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \sin(\psi_n - \gamma)) \right]^2 \dots \\ + \left[-k4 \cdot B2 \cdot C2 \cdot \sin(\alpha + \psi_n) \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) + vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \cos(\psi_n - \gamma)) \right]^2 \right] \\ Z_n + s \cdot vZ_n \\ vZ_n + \frac{s}{m} \cdot \left[-m \cdot g - cz \cdot Z_n - k01^2 \cdot vZ_n + k00(-a \cdot cz) \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t_n \cdot [vX_n \cdot (\cos(\alpha - \beta + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha - \beta + \psi_n)) + V0]}{L0} \right] \right] \\ \varphi_n + s \cdot \omega x_n \\ \omega x_n + \frac{s}{Jx} \cdot \left[k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot 1 \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \sin(\psi_n + \beta))^2 \cdot e1 \cdot 1 \dots \right. \\ \left. + k3 \cdot A2 \cdot C2 \cdot 1 \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \sin(\psi_n - \gamma))^2 \cdot e2 \cdot 1 \dots \right. \\ \left. + k00 \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \cdot \left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t_n \cdot [vX_n \cdot (\cos(\alpha - \beta + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha - \beta + \psi_n)) + V0]}{L0} \right] \right] \cdot \sin(\psi_n + \beta) \cdot e3 \right] \dots \\ + \omega y_n \cdot \omega z_n \cdot (Jy - Jz) - cT1 \cdot \varphi_n - bT1 \cdot \omega x_n \\ \theta_n + s \cdot \omega y_n \\ \omega y_n + \frac{s}{Jy} \cdot \left[k1 \cdot A1 \cdot C1 \cdot 1 \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vv \cdot \sin(\psi_n + \beta))^2 \cdot e1 \cdot 1 \dots \right. \\ \left. + k3 \cdot A2 \cdot C2 \cdot 1 \cdot (vX_n \cdot \sin(\alpha + \psi_n) - vY_n \cdot \cos(\alpha + \psi_n) + Vs \cdot \sin(\psi_n - \gamma))^2 \cdot e2 \cdot 1 \dots \right. \\ \left. + k00 \cdot \frac{a}{L0} \cdot m \cdot g \cdot \left[1 - \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{t_n \cdot [vX_n \cdot (\cos(\alpha - \beta + \psi_n) + vY_n \cdot \sin(\alpha - \beta + \psi_n)) + V0]}{L0} \right] \right] \cdot \cos(\psi_n + \beta) \cdot e4 \right] \dots \\ + \omega x_n \cdot \omega z_n \cdot (Jz - Jx) - cT2 \cdot \theta_n - bT2 \cdot \omega y_n \\ \psi_n + s \cdot \omega z_n \\ \omega z_n + \frac{s}{Jz} \cdot \left[U3 \cdot (\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n)) \cdot e4 \dots \right. \\ \left. + \left[U1 \cdot \sin \left[U2 \cdot [(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n) \cdot (\text{sign}(X_n \cdot \tan(\alpha) - Y_n)) - K \cdot \text{sign}(\psi_n)]] \right] \cdot e3 - (bT3 \cdot \omega z_n) + \omega x_n \cdot \omega y_n \cdot (Jx - Jy) \right] \right] \end{pmatrix}$$

Simulācijas sākuma noteikumi:

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ vX_0 \\ Y_0 \\ vY_0 \\ Z_0 \\ vZ_0 \\ \varphi_0 \\ \omega_x \\ \theta_0 \\ \omega_y \\ \psi_0 \\ \omega_z \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} 10 \\ 1 \\ 30 \\ 2 \\ -9.95 \\ 0 \\ 0.2 \\ 0.1 \\ 0 \\ 0.1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Parametri:

$$\begin{aligned} m &:= 9494000 & s &:= 0.002 & n &:= 0..190000 & g &:= 9.81 & t_n &:= n \cdot s \\ A &:= 123 & A1 &:= A & B &:= 9 & C &:= 10 & B2 &:= B & B1 &:= B \\ A2 &:= A & C1 &:= \frac{C}{2} & C2 &:= \frac{C}{2} & e5 &:= 10 & e6 &:= 10 & V0 &:= 2 & Vs &:= 0.1 & Vv &:= 3 \\ e1 &:= \frac{C1}{2} & e2 &:= \frac{C2}{2} & e3 &:= 50 & e4 &:= 20 & cz &:= m \cdot g \cdot 0.1 & T &:= 10 & a &:= 1.6 \\ bT1 &:= 5000000 & bT2 &:= 1000000000 & bT3 &:= 1000000000 & L0 &:= V0 \cdot T & T1 &:= 5 & T2 &:= 60 \\ J_x &:= m \cdot \frac{B^2 + C^2}{12} & J_y &:= m \cdot \frac{A^2 + C^2}{12} & J_z &:= m \cdot \frac{A^2 + B^2}{4} & cT1 &:= J_x \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T1}\right)^2 & cT2 &:= J_x \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T2}\right)^2 \cdot 100 \\ U1 &:= 150000 & U2 &:= \frac{\pi}{3} & U3 &:= 100000 & \alpha &:= \frac{\pi}{4} & \beta &:= \frac{\pi}{9} & \gamma &:= \frac{\pi}{40} \\ K &:= 10 & k00 &:= 0.001 & k01 &:= 500 & k0 &:= 1 & k1 &:= 0.1 & k2 &:= k1 & k3 &:= 10 & k4 &:= k3 \end{aligned}$$

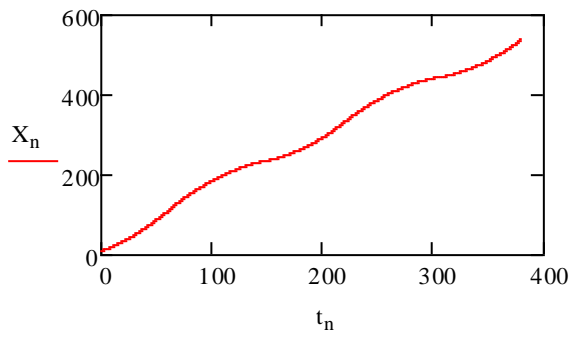
, kur

- m – peldošā objekta masa;
- s – integrācijas soļa garums;
- n – integrācijas soļu skaits;

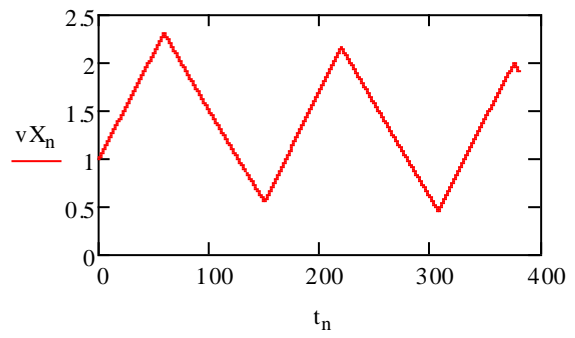
g – gravitācijas paātrinājums;
 t_n – simulācijas laiks;
 X_n – objekta pārvietojums pa x asi;
 vX_n – objekta ātrums pa x asi;
 Y_n – objekta pārvietojums pa y asi;
 vY_n – objekta ātrums pa y asi;
 Z_n – objekta ātrums pa z asi;
 vZ_n – objekta ātrums pa z asi;
 φ_n – objekta rotācijas leņķis ap x asi;
 ω_{x_n} – objekta leņķiskais ātrums ap x asi;
 θ_n – objekta rotācijas leņķis ap y asi;
 ω_{y_n} – objekta leņķiskais ātrums ap y asi;
 ψ_n – objekta rotācijas leņķis ap z asi;
 ω_{z_n} – objekta leņķiskais ātrums ap z asi;
 A – objekta garums;
 B – objekta platums;
 C – objekta augstums;
 $B1$ – gala virsmas platums, uz kuru iedarbojas vējš;
 $B2$ – gala virsmas platums, uz kuru iedarbojas ūdens;
 $A1$ – sānu virsmas garums, uz kuru iedarbojas vējš;
 $A2$ – sānu virsmas garums, uz kuru iedarbojas ūdens;
 $C1$ – sānu virsmas augstums, uz kuru iedarbojas vējš;
 $C2$ – gala virsmas augstums, uz kuru iedarbojas ūdens;
 $V0$ – viļņu kustības ātrums;
 Vs – absolūtais straumes ātrums;
 Vv – absolūtais vēja ātrums;
 $e1$ – vēja spēka plecs pret masas centru C ;
 $e2$ – straumes spēka plecs pret masas centru C ;
 $e3$ – viļņu spēka plecs pret masas centru C laterālā virzienā;
 $e4$ – viļņu spēka plecs pret masas centru C garenvirzienā;
 cz – arhimeda cēlējspēka atsperes komponente;
 $L0$ – periodiskais viļņa garums;
 a – viļņu amplitūda;

$bT1$ – rotācijas ātruma ap X asi slāpējošā spēka konstante
 $bT2$ – rotācijas ātruma ap Y asi slāpējošā spēka konstante
 $bT3$ – rotācijas ātruma ap Z asi slāpējošā spēka konstante
 T – viļņu periods
 $T1$ – objekta leņķiskais stingums ap X asi
 $T2$ – objekta leņķiskais stingums ap Y asi
 Jx – objekta inerces moments ap x asi
 Jy – objekta inerces moments ap y asi
 Jz – objekta inerces moments ap z asi
 $cT1$ – pagrieziņa ap X asi atperes spēka konstante
 $cT2$ – pagrieziņa ap Y asi atperes spēka konstante
 $U1$ – propulsīvais spēks, kas pielikts objekta garenvirzienā;
 $U2$ – propulsīvā spēka leņķis pret kuģa garenvirzienu;
 $U3$ – sekundārais propulsīvais spēks, kas pielikts objekta šķērsvirzienā;
 α – objekta kursa (uzstādītās trajektorijas) leņķis pret x asi;
 β – vēja virziena leņķis pret objekta kursu;
 γ – straumes virziena leņķis pret objekta kursu
 K - papildus propulsīvā spēka leņķa pret kuģa garenvirzienu komponente;
 $k00$ – viļņu iedarbības spēka konstante;
 $k01$ – arhimeda cēlējspēka viskozā komponente;
 $k0$ – straumes viskozās pretestības spēka koeficients;
 $k1$ – vēja pretestības spēka koeficients pa x asi;
 $k2$ – vēja pretestības spēka koeficients pa y asi;
 $k3$ – ūdens straumes pretestības spēka koeficients pa x asi;
 $k4$ – ūdens straumes pretestības spēka koeficients pa y asi;

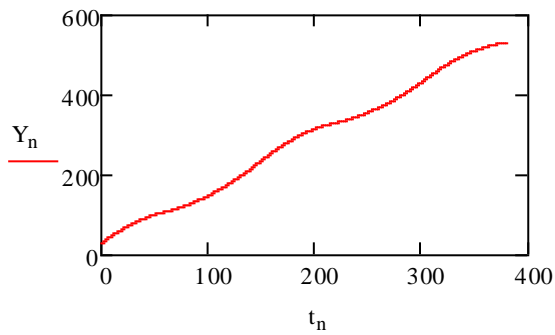
Sistēmas parametri izvēlēti ar mērķi līdzināties reāla kravas kuģa izmēriem.
 Iegūstam sekojošus simulācijas rezultātus:



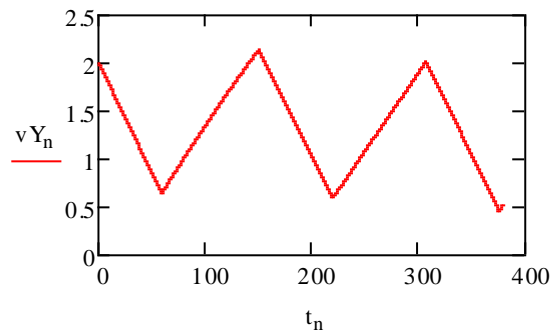
Att. 6.3.1. Peldoša objekta pārvietojums pa X asi.



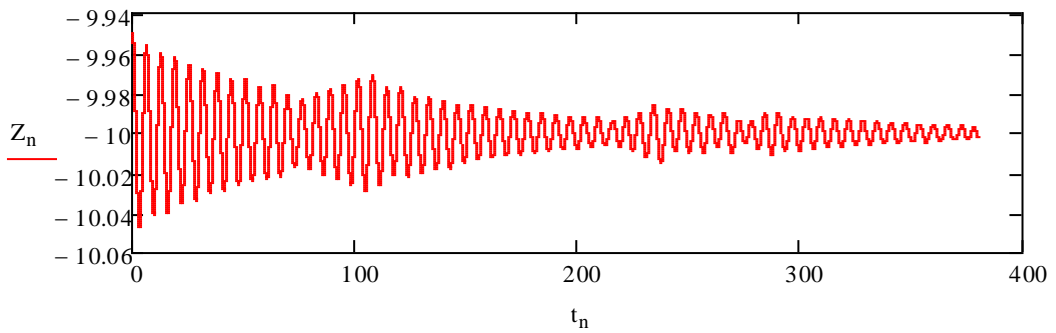
Att. 6.3.2. Peldoša objekta ātrums pa X asi.



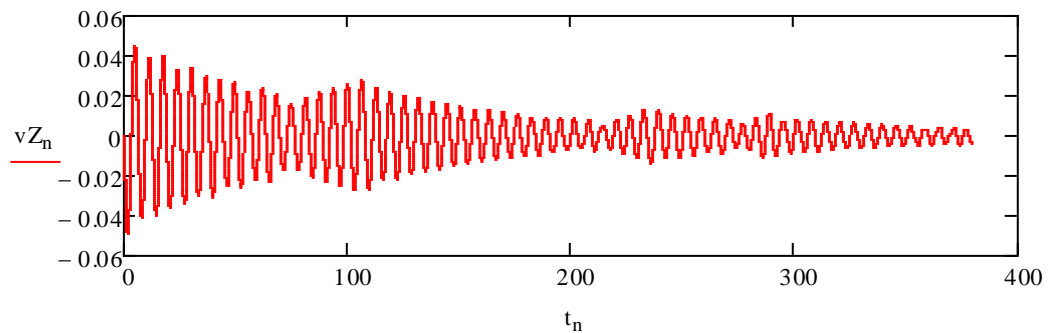
Att. 6.3.3. Peldoša objekta pārvietojums pa Y asi.



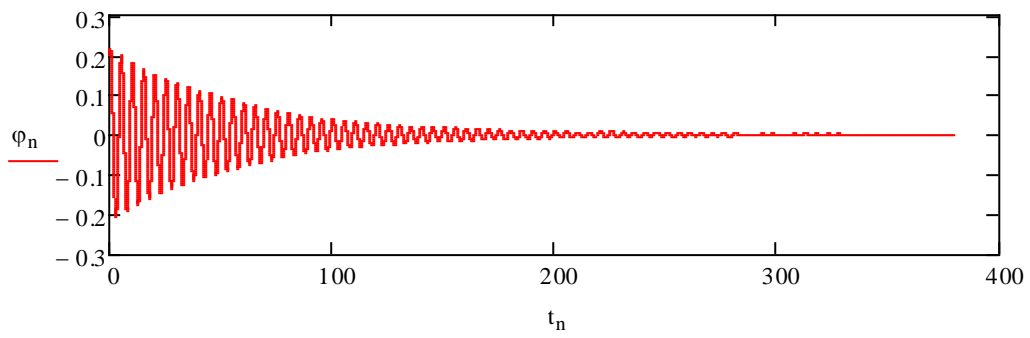
Att. 6.3.4. Peldoša objekta ātrums pa Y asi.



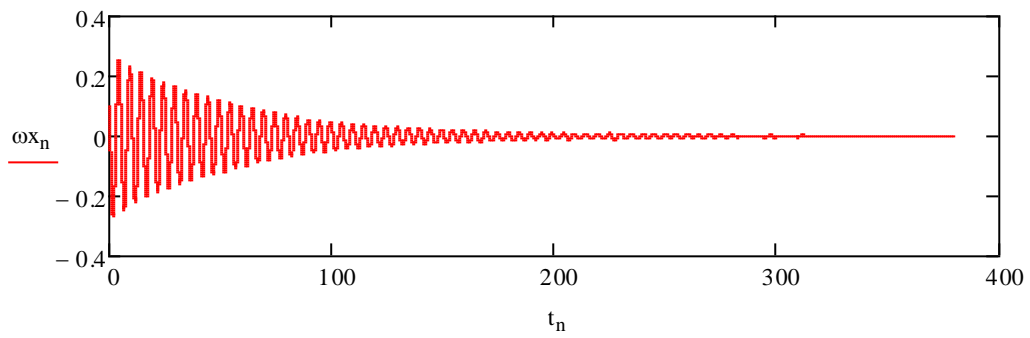
Att. 6.3.5. Peldoša objekta pārvietojums pa Z asi.



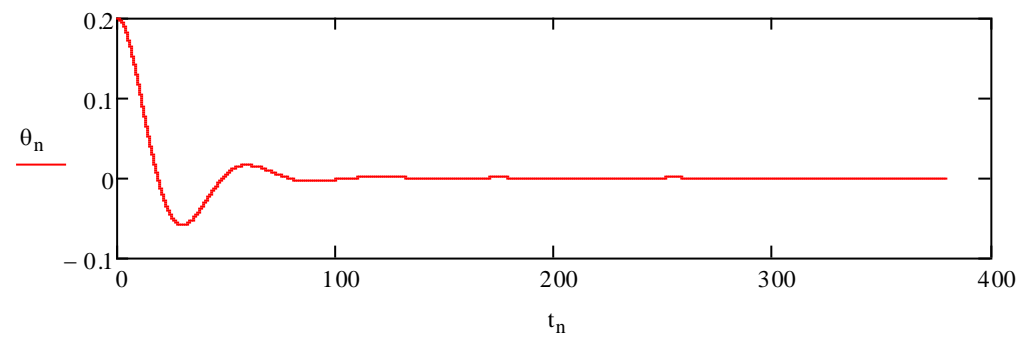
Att. 6.3.6. Peldoša objekta ātrums pa Z asi.



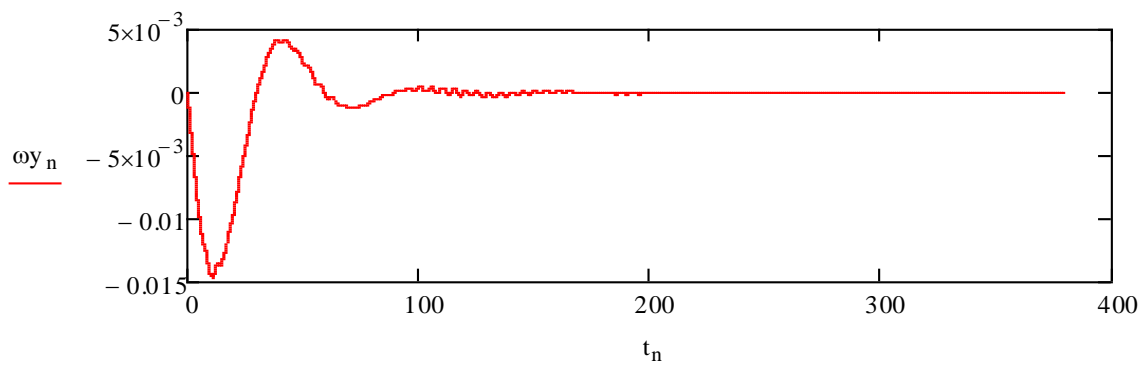
Att. 6.3.7. Peldoša objekta pagrieziena leņķis ap X asi.



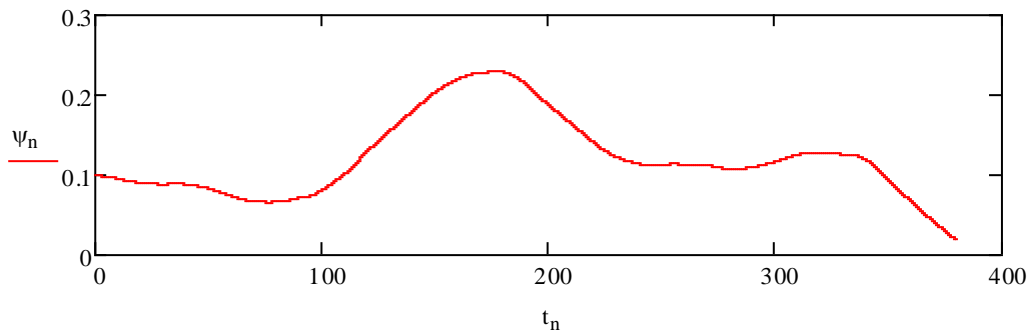
Att. 6.3.8. Peldoša objekta pagrieziena leņķa ātrums ap X asi.



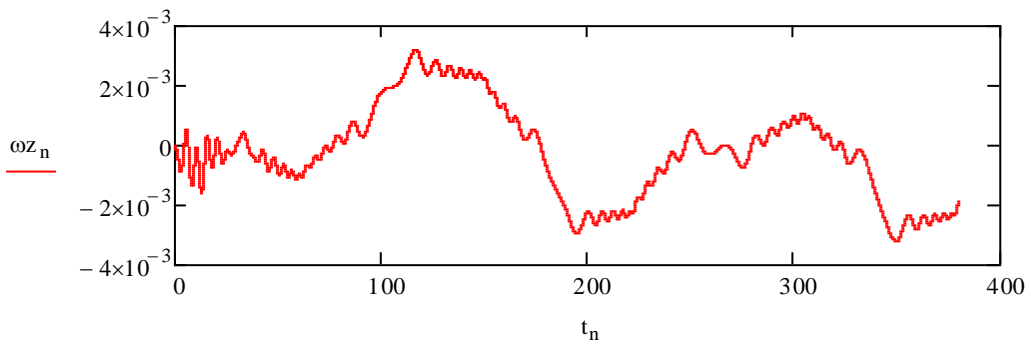
Att. 6.3.9. Peldoša objekta pagrieziena leņķis ap Y asi.



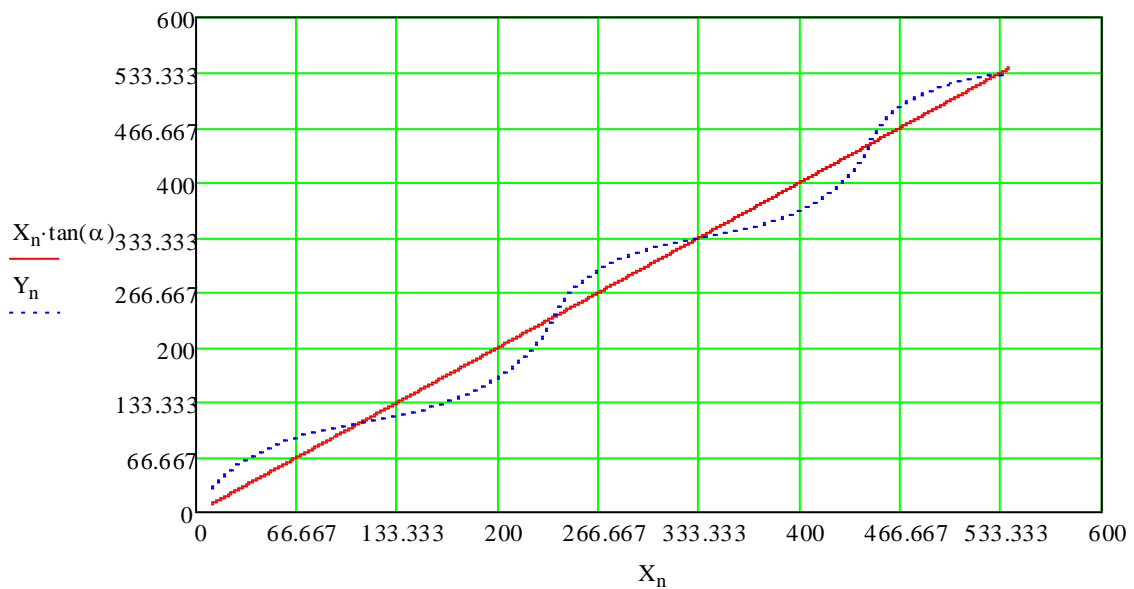
Att. 6.3.10. Peldoša objekta pagrieziena leņķa ātrums ap Y asi.



Att. 6.3.11. Peldoša objekta pagrieziens ap Z asi.



Att. 6.3.12. Peldoša objekta pagrieziens ap Z asi.



Att. 6.3.13. Peldoša objekta trajektorija pret uzstādīto kursu.

Kā redzams no augstāk minētajiem grafikiem, dotajā nodaļā minētās simulācijas iespējas ir visai plašas. Lielais parametru skaits (46), kā arī sākuma nosacījumi (12) dod iespēju pētīt matemātisko modeli no ļoti daudziem aspektiem. Iespējams pētīt atsevišķu vižu

radīto spēku iedarbību uz objektu. Konkrētie vadības parametri pieskaņoti tā, lai simulācija maksimāli tuvinātos reāla objekta dinamikai telpā un laikā.

Secinājumi

1. Izstrādātais modelis ar 6 kustības brīvības pakāpēm var kalpot kā jauns aprēķinu modelis objektu dinamikas pētīšanai reālas vides apstākļos;
2. Radīta jauna skaitliskā metodika peldoša objekta vadībai, ievērojot vēja, straumes un viļņu mijiedarbību ar peldošu objektu;
3. Papildināta teorija par peldošu objektu dinamikas analīzi un kustības vadības sintēzi.

7. 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 paņēmieni 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 harmonisko 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

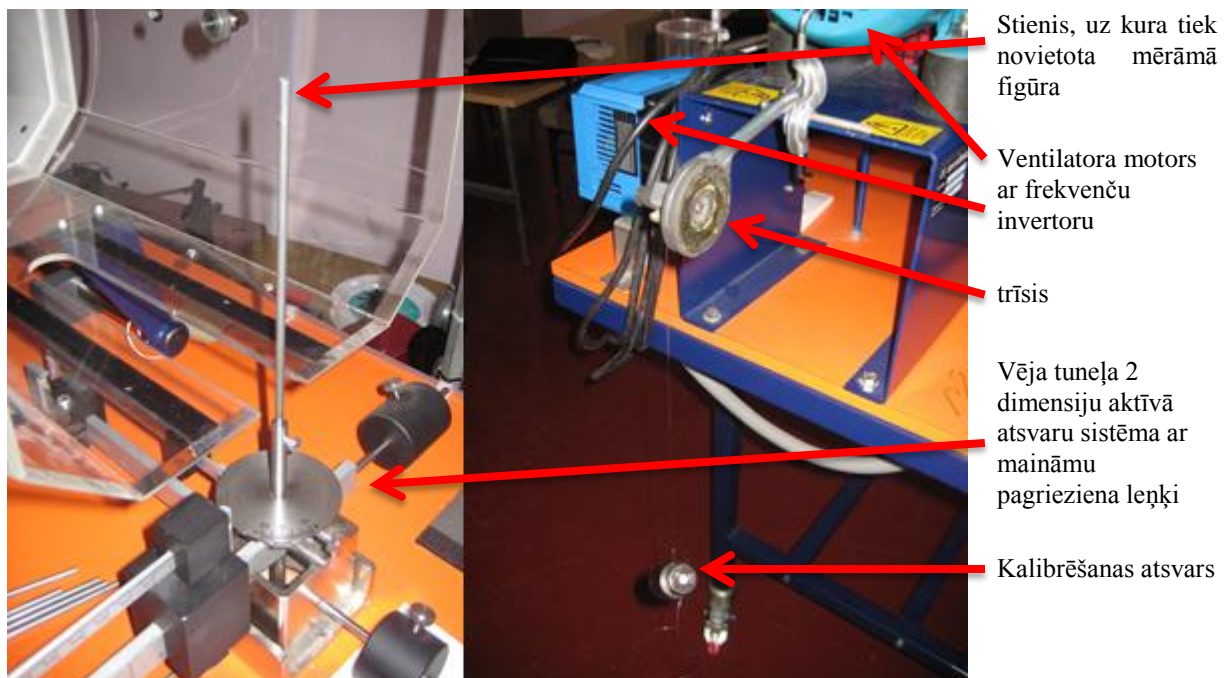
viļņveida izliekums pārvietotos aksiāli korpusam, veidojot pozitīvu atgrūšanās spēku pret apkārtējo vidi, turpretī radīto laterālo spēku summa izlīdzinātos bez rezultējoša vilces spēka.

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.

8. PIELIKUMS

8.1. Eksperimenti vēja tunelī

Izmantojot Armfield vēja tuneli tika veikta virkne eksperimentu ar mērķi noteikt dažādu vienkāršanas formas un pārklājumu priekšmetu vilces jeb „drag” koeficientus un salīdzināt tos savā starpā un ar literatūrā pieejamajiem. Tika iegūti ļoti interesanti dati, piemēram, 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. Diemžēl pilnīgu izklāstu dotā darba ietvaros nav iespējas sniegt. Attēli un rezultāti turpinājumā.

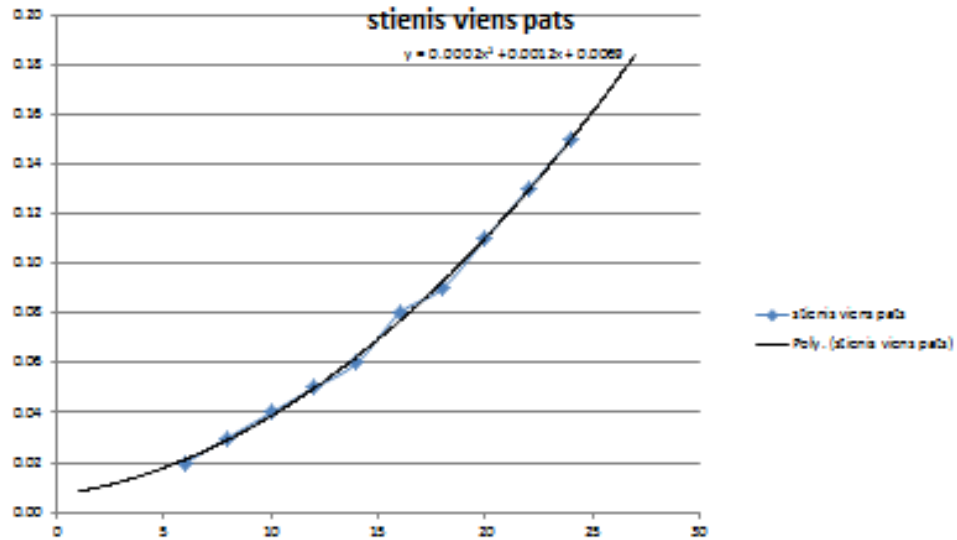


Att. 8.1. Vēja tuneļa atsvaru sistēmas kalibrēšana

Tabula 8.1. Gaisa pretestības koeficientu mērījumu gaisa tunelī rezultāti

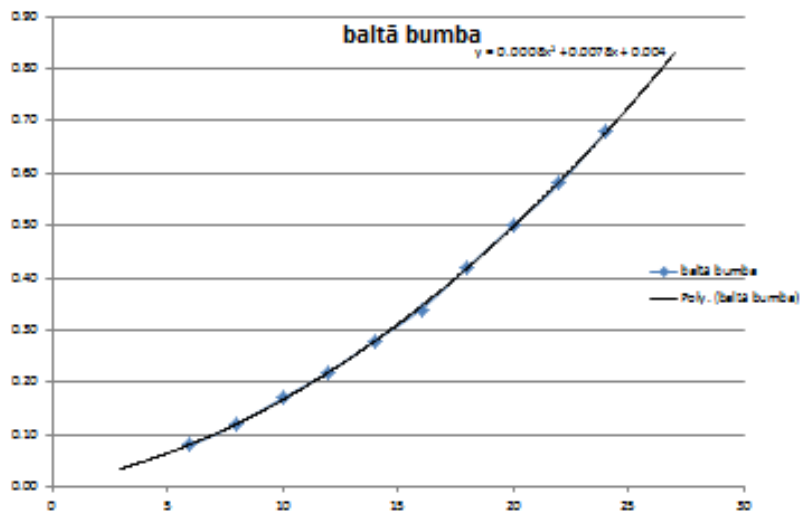
mērījums	m/s	Hz	stienis	baltā bumba	kubs plakne	kubs šķautne	kubs sturis	cilindrs plakne	cilindrs mala	rozā bumba	pūkainā Bumba
diametrs	-	-	-	72.5	-	-	-	30.3	30.3	44	44
mala	-	-	-	-	30	30	30	20.1	20.1	na	na
nosegtā stieņa virsmā				36.25	15	21.2132	21.2132	15.15	15.15	22	22
1	6	13.30	0.02	0.08	0.03	0.04	0.06	0.02	0.03	0.06	0.06
2	8	17.00	0.03	0.12	0.04	0.06	0.08	0.05	0.04	0.07	0.08
3	10	20.80	0.04	0.17	0.06	0.09	0.11	0.07	0.06	0.10	0.10
4	12	24.70	0.05	0.22	0.08	0.13	0.15	0.10	0.08	0.13	0.13
5	14	28.60	0.06	0.28	0.11	0.16	0.20	0.15	0.11	0.16	0.16
6	16	32.60	0.08	0.34	0.15	0.21	0.25	0.19	0.13	0.20	0.20
7	18	36.70	0.09	0.42	0.19	0.25	0.31	0.25	0.17	0.26	0.23
8	20	40.80	0.11	0.50	0.24	0.32	0.37	0.30	0.21	0.31	0.27
9	22	45.20	0.13	0.58	0.29	0.38	0.44	0.36	0.25	0.38	0.32
10	24	49.40	0.15	0.68	0.35	0.47	0.53	0.43	0.30	0.46	0.37

Eksperimenti vēja tunelī



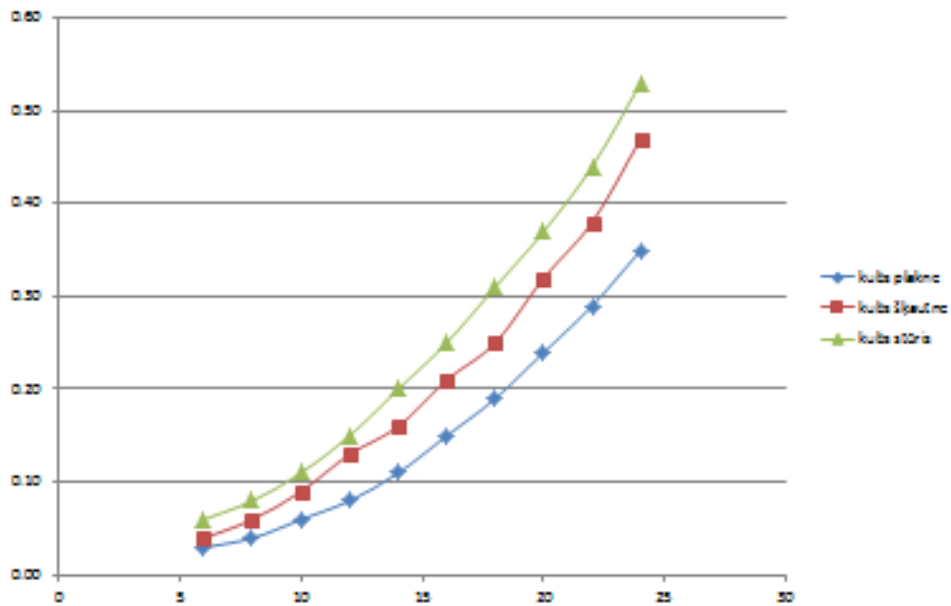
Att. 8.2. Atbalsta stieņa pretestības spēka līkne

Eksperimenti vēja tunelī



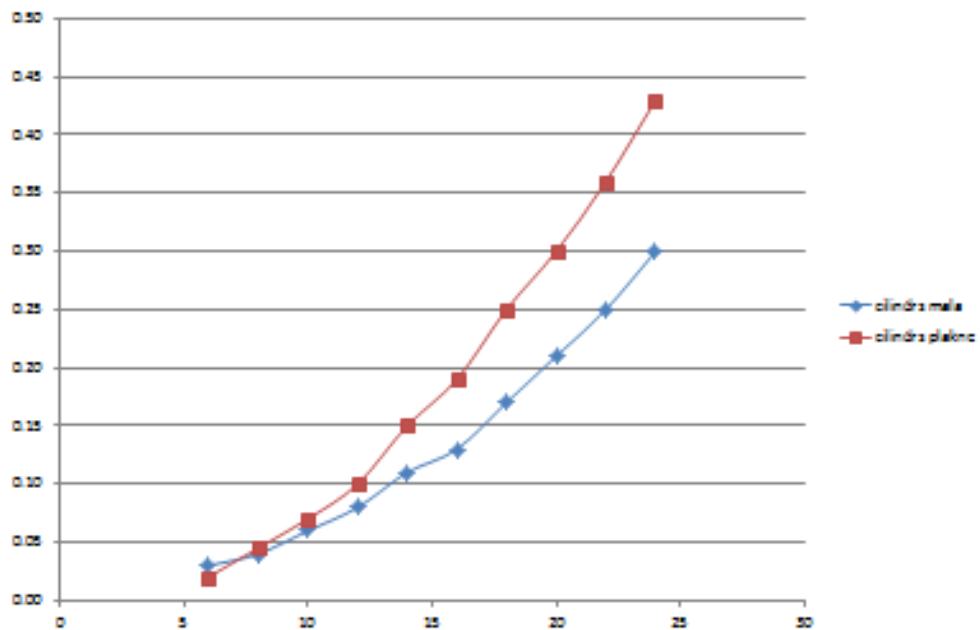
Att. 8.3. Eksperimenta objekta (baltā sfēra) pretestības spēka līkne

Eksperimenti vēja tunelī



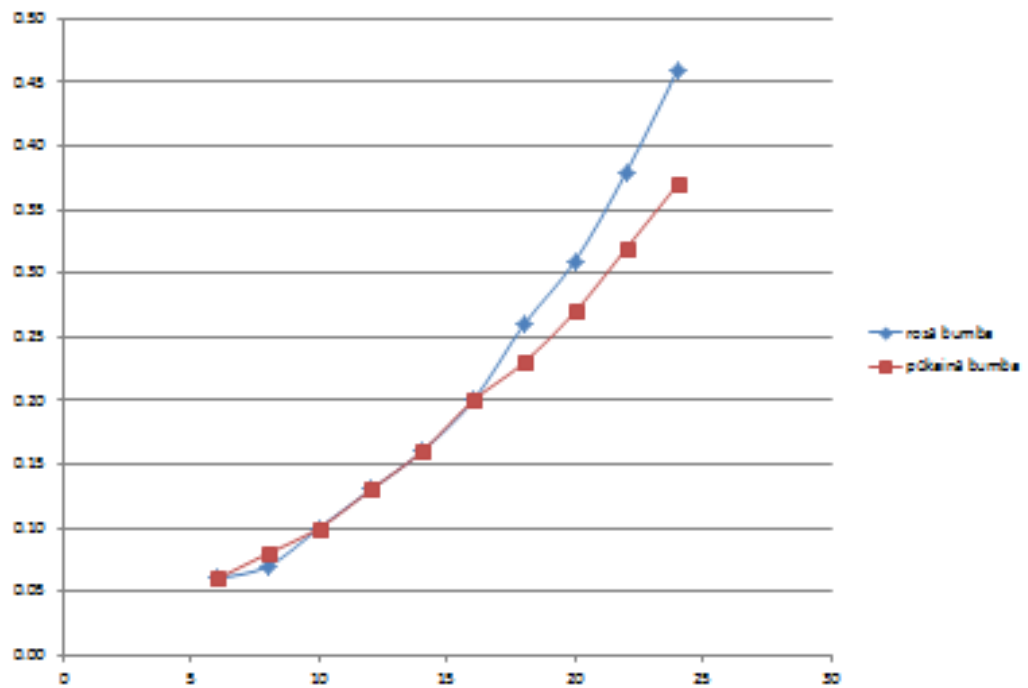
Att. 8.4. Eksperimenta objekta (kubs) pretestības spēka līknes atkarībā no objekta leņķa pret plūsmu

Eksperimenti vēja tunelī



Att. 8.5. Eksperimenta objekta (cilindrs) pretestības spēka līknes atkarībā no objekta leņķa pret plūsmu

Eksperimenti vēja tunelī



Att. 8.6. Eksperimenta objektu (sfēras) ar dažādiem virsmu pārklājumiem pretestības spēka līknes.

Eksperimenti vēja tunelī



Att. 8.7. Eksperimentos izmantotie objekti.

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.Nikravesh „*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 „*Analitical 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*” / Baskrishnan-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](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 & Sons. 2006.
49. „*Engineering Mechanics.*” Dynamics. H. L. Langhaar, A. P. Boresi. McGRAW-Hill BOOK COMPANY. - New York, Toronto, London, 1959. – 719.p.