

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Atis VILKĀJS**

**POZICIONĒŠANAS SISTĒMU DINAMIKAS ANALĪZE,  
VADĪBAS OPTIMIZĀCIJA UN KONSTRUKCIJU SINTĒZE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2013**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Transporta un mašīnzinību fakultāte  
Mehānikas institūts

**Atis VILKĀJS**

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**POZICIONĒŠANAS SISTĒMU DINAMIKAS ANALĪZE,  
VADĪBAS OPTIMIZĀCIJA UN KONSTRUKCIJU SINTĒZE**

**Promocijas darba kopsavilkums**

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

**Rīga 2013**

UDK .....

Vilkājs A. Pozicionēšanas sistēmu dinamikas analīze,  
vadības optimizācija un konstrukciju sintēze.  
Promocijas darba kopsavilkums. – R.:RTU, 2013. – 22  
lpp.

Iespiests saskaņā ar MI 2013. gada 19. februāra  
lēmumu, protokols Nr. 4.

ISBN .....



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

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

Promocijas darbs inženierzinātņu (inženiertehnikas, mehānikas un mašīnbūves) doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. .... Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, ..... auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr. sc. ing., Bruno Grasmanis  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr. habil. sc. ing., Algimantas Bubulis  
Kauņas tehnoloģiskā universitāte, Lietuva

Profesors, Dr. habil. sc. ing., Juris Cimanskis  
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Atis Vilkājs .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 2 pielikumus, 119 attēlus un 1 tabulu, kopā 107 lappuses. Literatūras sarakstā ir 24 nosaukumi.

## SATURA RĀDĪTĀJS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķis un galvenie uzdevumi.....	5
Pētījuma objekts.....	5
Pētījuma hipotēzes.....	5
Zinātniskā novitāte.....	6
Darba praktiskais pielietojums.....	6
Darba struktūra un galvenie rezultāti.....	6
Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes.....	6
Būtiskāko publikāciju saraksts.....	6
DARBA SATURS.....	7
Pirmā nodaļa.....	7
Otrā nodaļa.....	8
Trešā nodaļa.....	11
Ceturtnā nodaļa.....	13
Piektā nodaļa.....	14
SECINĀJUMI.....	21
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	21

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Tēmas aktualitāte ir saistīta ar ātras darbības mehatronisku pozicionēšanas sistēmu teorijas un konstrukciju izstrādāšanu, kuras atļauj automatizēt bioloģiskos testu un analīžu veikšanu, kas vairāk kārt (ap 10 reižu) palielina tehnoloģiskā procesa produktivitāti un aizstāj nogurdinošu cilvēka roku darbu 3-D kustībā (apsekojot ap 100 līdz 200 pozīciju vienā testā).

## Darba mērķis un galvenie uzdevumi

Darba mērķis ir radīt principiāli jaunus ātras darbības 2-D (divu dimensiju) un 3-D (trīs dimensiju) biočipu sistēmu robotizētus izpildmehānismus (aktuatorus), pilnveidojot mašīnu un mehānismu optimālās sintēzes teoriju pozicionēšanas jomā.

Galvenie uzdevumi ir:

1. Veikt esošo pētījumu analīzi par optimālo vadības sintēzi;
2. Pilnveidot esošo metodi un izstrādāt jaunu metodiku pozicionēšanas sistēmu optimizācijai ar impulsu un jauktu ierosmi pie vadības un fāzu koordinātu ierobežojumiem;
3. Izstrādāt metodiku vadības sintēzei adaptīvās ierosmes sistēmās, pielietojot atgriezeniskās saites kā fāzu koordinātu funkcijas;
4. Papildināt adaptīvās vadības teoriju ar vadības sintēzi jauktās (adaptīvās un laika ierosmju) sistēmās pie gadījuma parametriem;
5. Uz sintezēto pozicionēšanas sistēmu bāzes veikt reālu pozicionēšanas sistēmu (iekārtu) radīšanu ar Solid Works programmatūras palīdzību SIA „Biosan”;
6. Veikt pozicionēšanas sistēmu (iekārtu) izmēģināšanu SIA „Biosan” un pārbaudīt teorētisko pētījumu validāciju eksperimentāli.

## Pētījuma objekts

Pētījuma objekts ir robotizētu pozicionēšanas sistēmu izpildmehānismu optimālā vadība, optimizējot esošās vadības sistēmas, kā arī izstrādājot jaunu sistēmu vadīšanu metodiku.

## Pētījuma hipotēzes

Galvenās pētījumu hipotēzes ir šādas:

1. Robotu dinamikas analīzes uzdevumos pielietojama klasiskās mehānikas (Ņūtona) teorija, ietverot arī objektu sadursmes (trīcienu);
2. Robotizētos izpildmehānismos kā aktuatora vadības iedarbības iespējams izmantot trīs veida mijiedarbības: - spēka ierosmes; - impulsu ierosmes; - jauktas ierosmes (kopā spēka un impulsu ierosmes);
3. Sintezējot robotizēto mehānismu kustības (ģenerēšanā un bremzēšanā) pielietojamas sausās berzes, viskozās pretestības un nelineārās pretestības mijiedarbības;
4. Objektu trieciena mijiedarbību modelēšanā pielietojami stereomehānikas modeļi.

## Zinātniskā novitāte

Darba novitāte ietver pētījumus robotizēto izpildmehānismu sintēzes jomā (pozicionēšanā). Kā parāda autora ziņojumi starptautiskās konferencēs, optimālās sintēzes teorija robotizēto mehānismu optimizācijā un reālu objektu sintēzē, pasaules praksē tiek pielietota pirmo reizi.

## Darba praktiskais pielietojums

Darba praktiskais pielietojums ietver reālu robotizēto izpildmehānismu izgatavošanu un eksperimentālo pārbaudi. Daļa no pozicionēšanas robotiem pārdoti ASV, kā arī citās valstīs.

## Darba struktūra un galvenie rezultāti

Darbs sastāv no literatūras apskata, 6 nodaļām un secinājumiem, kopā 107. lpp. Darba galvenie rezultāti ir šādi:

1. **Pilnveidota metode** pozicionēšanas sistēmu optimizācijā ar spēka ierosmi;
2. Izstrādāta **jauna metode** pozicionēšanas sistēmu optimizācijā **ar impulsa ierosmi**;
3. Izstrādāta **jauna metode** pozicionēšanas sistēmu optimizācijā **ar jauktu** (spēka un impulsa) **ierosmi**;
4. Uz programmas MathCAD bāzes **izstrādātas 6** vadības uzdevumu sintēzes **programmas**, kuras pielietojamas inženieru sintēzes uzdevumu aprēķinos;
5. Teorētiski **sintezētas** jaunu robotizētu izpildmehānismu (aktuātoru) vadības iekārtas, uz kuru bāzes iespējams radīt jaunas ātrdarbīgas pozicionēšanas iekārtas;
6. Ar Solid Works programmatūru **izprojektēti un nodoti ražošanā reāli vadības mehānismi** un robotizētas iekārtas, kas pārbaudīti eksperimentāli, un, kuri darbojas ASV un citās valstīs.

## Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes

1. Robotu dinamikas sintēzes uzdevumos pielietojama klasiskās mehānikas teorija.
2. Pozicionēšanas aktuātoru vadības ģenerēšanai iespējams izmantot trīs veida mijiedarbības (spēka, impulsa un jauktas darbības).
3. Objektu triecienu mijiedarbību modelēšanā pielietojami stereomehānikas modeļi.

## Būtiskāko publikācijas saraksts

Par darba tematiku ir sagatavotas 10 publikācijas, no tām 5 ir citējamās izdevumos. Darbs ziņots 12 starptautiskās konferencēs Latvijā, Lietuvā, Polijā, Čehijā, Krievijā.

Zinātnisko publikāciju saraksts promocijas darba izstrādes laikā:

1. Janis Viba, Edgars Kovals, Atis Vilkajs. "Vibration damping of cargo like pendulum inside vehicle hull". 7 th International Scientific Conference „Engineering for Rual Development”, May 29 - 30, 2008 Latvia , Jelgava. 169 - 172 lpp.
2. „Synthesis of Vibrator With Air or Water Flow Excitation”. J. Viba, L. Shtals, A. Vilkajs, E. Kovals. The 4TH International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM 2008, 14 - 17 July, Bialystok, Poland. 147 - 148 lpp.

3. „Nonlinear optimal synthesis of the vibrator with flow excitation“. J. Viba, L. Shtals, A. Vilkajs, E. Kovals. Rare attractors and rare phenomena in nonlinear dynamics. 2008., 8-12 september. Rīga, RTU, 2008. 131 - 137 lpp.
4. „Nonlinear optimal synthesis of the vibrator with flow excitation“. J. Viba, L. Shtals, A. Vilkajs, E. Kovals. JVE Journal of Vibroengineering – December 2008, Vilnius, Lithuanian. 493 - 496 lpp.  
Citēts: THOMSON SCIENTIFIC, EBSCO, VINITI u.c.
5. J. Viba, E. Kovals, A. Vilkajs. „Vibration damping of cargo like pendulum inside vehicle hull“. Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем “DYVIS-2009”, Москва – Звенигород 2009, июнь. 463 - 468 lpp.
6. „Synthesis of vibrator with air or water flow excitation“. J. Viba, L. Shtals, A. Vilkajs, E. Kovals. Solid State Phenomena Volts. 147-149. 2009 Switzerland, 462 - 467 lpp.
7. Atis Vilkājs, Sergejs Djacenko, Janis Viba. „Biočipu robota izstrāde“. RTU zinātnisko rakstu krājums, sērija 6, 33 sējums, Mašīnzinātne un transports, Rīga 2010. 55 - 59 lpp.
8. „Optimization of Vibrator Motion with Air Flow Excitation“. J. Viba, M. Eiduks, L. Shtals, E. Kovals, A. Vilkajs. JVE Journal of Vibroengineering. - Vol.12, Issue 1. (2010) 34 - 42. lpp.  
Citēts: THOMSON SCIENTIFIC, EBSCO, VINITI u.c.
9. „Cargo Pendulum Vibration Damping inside Vehicle Hull“. J. Viba, A. Vilkajs, E. Kovals, B. Grasmanis. JVE Journal of Vibroengineering. - Vol.12, Issue 4. (2010), 381 - 387 lpp.  
Citēts: THOMSON SCIENTIFIC, EBSCO, VINITI u.c.
10. A. Vilkajs, S. Djacenko, E. Kovals. „Design and production of biochip robot“. Vibrations Problems ICOVP 2001. The 10th International Conference on Vibration Problems. ICoVP-2011. 2011, PRAGUE, Czech Republic. 302 - 307 lpp.

## DARBA SATURS

### Pirmā nodaļa

Pirmajā nodaļā ir veikta esošo pētījumu analīze par optimālo vadības sintēzi.

Elektrisko piedziņu optimālās vadības uzdevumiem ir divas nozīmīgi atšķirīgas nostādnes. Pirmā no tām attiecas uz tā saucamo stabilizācijas uzdevumu, kurā tiek apskatīts vadāmo mehānismu uzvedība nostabilizējošā režīmā vai novērošanas režīmā. Otra attiecas uz vadības procesiem, kuros darbojošais mehānisms pāriet no viena stāvokļa otrā, pie nosacījuma, sasniedzot maksimumu (minimumu) kaut kādam, iepriekš uzdotam kvalitātes kritērijam. Šo otro pieņemts saukt par optimālās vadības uzdevumu.

No uzdevuma iepriekšējās analīzes iegūtie dati atļauj noformēt sekojošus optimālos vadības uzdevumu: noteikt no visām pieļaujamām vadībām  $u$  un  $S_j$  dotos diapazonos (1)

$$u \subset u_0, \quad S_j \subset S_0, \quad (1)$$

pāriet uz apakšsistēmu apakšsistēmai

$$\dot{x} = f(t, x, u) + \frac{S_j}{m} \delta(t - t_j), \quad (2)$$

pārejot no sākotnējā stāvokļa  $x_0$  un beigu stāvokli  $x_l$ , tādu, kurš piedod optimizācijas kritērijam

$$K = \int_{t_0}^{t_1} f_0(t, x, u, S_j, t_j) dt, \quad (3)$$

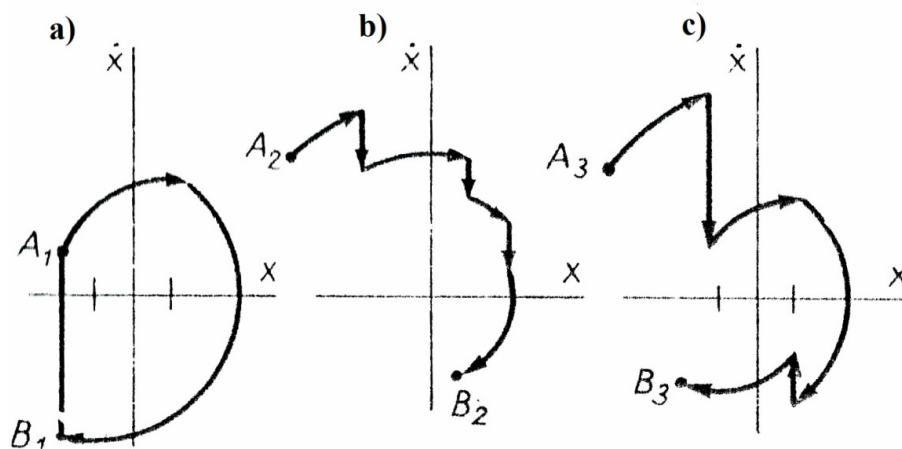
minimālo (vai maksimālo) iespējamo vērtību, ja ir papildus ierobežojumi

$$z \leq z_0; \quad \tau \geq \tau_0; \quad |\dot{x}| \leq v_0; \quad |x| \leq A_0, \quad (4)$$

kur  $z, \tau$  – triecienu impulsu vērtības un to sekošanas laiks,  $z_0, \tau_0, v_0, A_0$  – ierobežojumi.

Pie šīs sistēmas aprēķina ir svarīgi ievērot vibrositienu īpašības.

Ja tiek tikai izmantota spēka vadība ((1) – (4) pie  $S_j = 0$ ), tad uzdevums tiek rēķināts ar jebkuru optimālās vadības piemēroto teorijas metodi: pēc Pontrjagina maksimuma principa, ar variācijas izskaitļošanas aparāta palīdzību, ar momentu metodi vai arī ar citiem paņēmieniem (1. att. a).



1. att. Ātrums atkarībā no pārvietojuma.

Ja ir impulsīvā vai arī jauktā vadība, tad uzdevuma aprēķins tiek apgrūtināts tā, ka tiek fiksēti sitiena impulsi  $S_j$  (īpaši pasīvie, tas ir, formulējumi pie ķermeņu sadursmes citam pret citu, kā arī ar ierobežojumiem) un papildus jāievēro ierobežojumi (4) optimalitātes kritērijam  $K$ , kuram piemīt sarežģīta struktūra (3).

Sakarā ar dotajiem apstākļiem, tiek piedāvāta risinājuma meklēšanas metode priekš impulsu vadības ( $u=0$ ), kura tiek pamatota ar pirmās variācijas izmantošanu optimizācijas kritērijam  $\delta K$ . Uzdevumu risina šādā veidā (1. att. b).

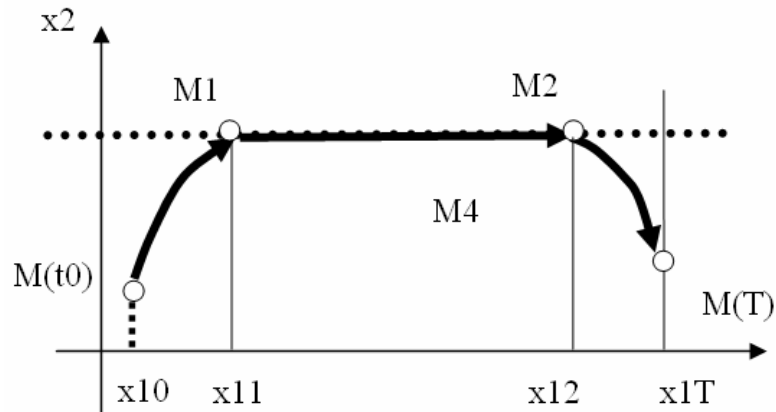
Sākumā tiek integrēti apakšsistēmas kustības vienādojumi laika robežās  $t_{j-1} < t < t_j$  starp impulsiem  $S_j$ . Tālāk tiek savienotas fāzu trajektorijas (no sākuma punkta  $t_0$ , uz beigu punktu  $t_1$ , kā arī šķēlumu punktos  $t_j$ ), sastādot vadības vienādojumus fāzu trajektorijai un impulsiem  $S$  ar robežnosacījumiem, papildinot tos ar vienu vienādojumu kritērija  $K$  noteikšanai (3).

## Otrā nodaļa

Šajā nodaļā tiek apskatīta pozicionēšanas sistēmu optimizācija, kur tiek analizētas ierobežotu spēku, ierobežotu fāzu koordinātu un jauktas vadības sistēmu optimizācijas.

***Ierobežota spēka un ierobežotas fāzu koordinātes (ātruma) vadības sistēmas optimizācija.***

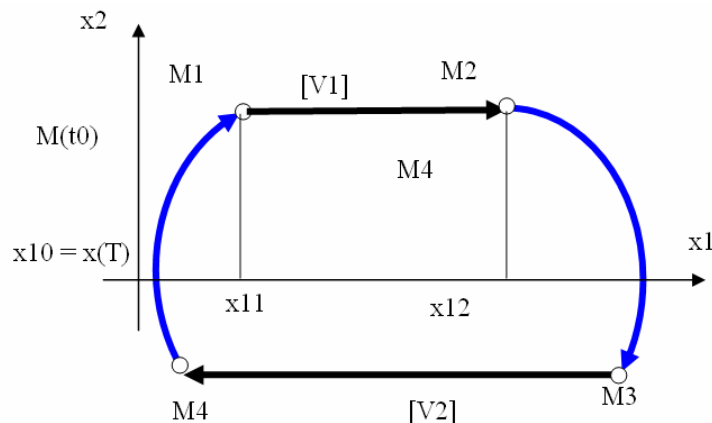
Optimizācijas uzdevums pa posmiem ir līdzīgs iepriekš aplūkotajiem un šeit netiek atkārtots. Vispirms tiek aplūkota izeja uz ierobežojuma, tad nokļūšana no ierobežojuma norādītajā fāzu koordinātu punktā. Optimālās kustības piemērs parādīts 2. att.



2. att. Optimālā trajektorija fāzu plaknē, ja ir ātruma ierobežojums. Izeja uz ierobežojumu notiek ar maksimālo vadību, attiecīgi pāreja no ierobežojuma uz doto fāzu plaknes punktu notiek ar maksimālo bremsēšanu. Protams, reālās situācijās ir problēma novadīt objektu pa doto trajektoriju, jo parasti ir mainīgi berzes spēki, kas traucē nokļūt vēlamā punktā pa optimālo trajektoriju.

***Ierobežota spēka un ierobežotu fāzu koordinātu cikliskas vadības sistēmas optimizācija***

Cikliskās kustības vadīšanas optimizācija ir līdzīga iepriekšējās vadības optimizācijai. Sistēmai ar vienu brīvības pakāpi cikliskās optimālās kustības trajektorija fāzu plaknē parādīta 3. att. Komentāri par šo vadību doti zem attēla.

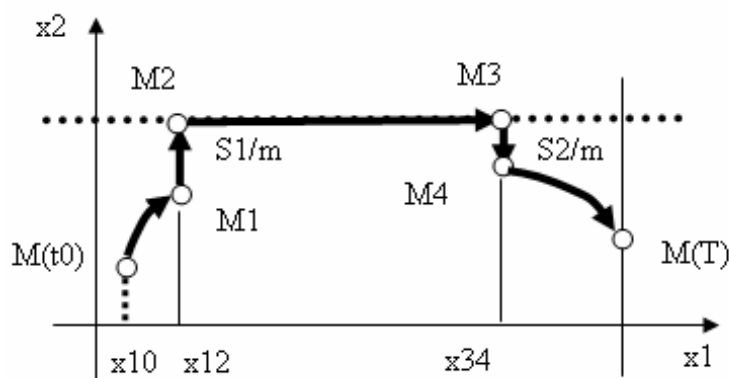


3. att. Optimālā trajektorija cikliskā (periodiskā kustībā), kad ir divi ātrumu ierobežojumi ar dažādām vērtībām: kustībai vienā virzienā [V1], pretējā [V2]. Šādai vadībai ir nepieciešama speciāla sintēze fāzu plaknē, jo jā saglabā vadības ieslēgšanās un bremsēšana, pie kam kustībā pa ierobežojumu vadībai jā kompensē pretestības spēki.

***Jauktas vadības (spēka un impulsu) sistēmu optimizācija pie ierobežotām fāzu koordinātēm***

Jauktās vadības optimizācijas uzdevuma atrisinājums sastāv no daļām: vispirms sadala kustību trajektoriju vairākās daļās, atkarībā no tā, kur pielikti vadības impulsi vai ātruma ierobežojumi; pēc tam pa posmiem atrisina parastos optimizācijas uzdevumus; trešā etapā ar robežu noteikumiem apvieno kustības trajektorijas; pēdējā etapā pielieto saišu variācijas metodi un atrod kopējo optimālo trajektoriju.

Piemērs necikliskā kustībā parādīts 4. att.



4. att. Piemērs ar spēka ierobežojumu, ar diviem impulsiem un vienu ātruma ierobežojumu. Vadībai posmos  $M(t_0) - M_1$  un  $M_4 - M(T)$  ir spēka ierobežojums, posmā  $M_2 - M_3$  ir ātruma ierobežojums un vēl ir divi impulsi  $S_1$  un  $S_2$ , kuriem ierobežotas vērtības.

Saišu vienādojumi 4. att. parādītam kustības gadījumam ir:

$$v_{12} = \frac{U_{10}}{m} \cdot t_1 + v_{10}; \quad (5)$$

$$x_{12} = \frac{U_{10}}{m \cdot 2} \cdot t_1^2 + v_{10} \cdot t_1 + x_{10}; \quad (6)$$

$$V_1 = v_{12} + \frac{S_1}{m}; \quad (7)$$

$$x_{34} = V_1 \cdot t_2; \quad (8)$$

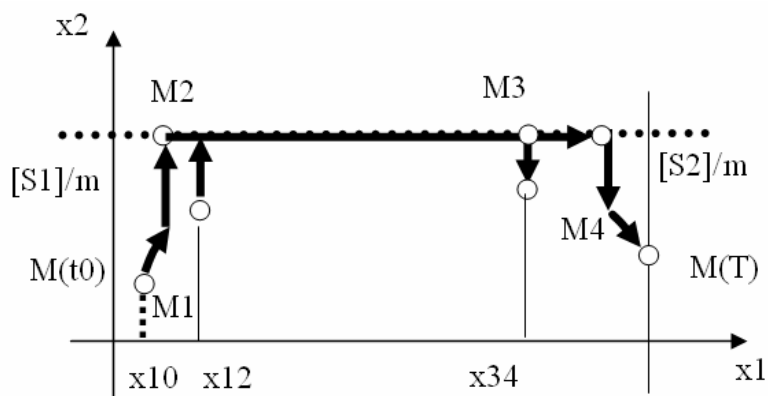
$$x_{34} = V_1 - \frac{S_2}{m}; \quad (9)$$

$$v_T = v_{34} - \frac{U_{11}}{m} \cdot t_3; \quad (10)$$

$$x_T = v_{34} \cdot t_3 - \frac{U_{11}}{m} \cdot t_3^2 + x_2; \quad (11)$$

$$T = t_1 + t_2 + t_3. \quad (12)$$

Variējot saišu vienādojumus var atrast optimālo vadības kustību, kura parādīta 5. attēlā.



5. att. Optimālās vadības atrisinājums: spēka vadība ir uz ierobežojumiem  $U_{10}$ ,  $U_{11}$ . Tāpat uz ierobežojumiem ir impulsu vadība  $[S_1]$ ,  $[S_2]$ .

## Trešā nodaļa

Optimālās sintēzes optimizācijas etapā izvēlētās apakšsistēmas vadība  $u = u(t)$  tiek atrasta kā laika funkcija, jo optimizācijas kritērija  $K$  variācija tiek meklēta kā laika funkcija:

$$\delta K = f(\delta t) \quad (13)$$

kur:  $\delta K$  - optimizācijas kritērija variācija;  $\delta t$  - laika variācija.

Optimizācijas uzdevumos atrastā vadība kā laika funkcija ne vienmēr ir stabila reālajos apstākļos, kā rezultātā sistēmas kustības laikā rodas traucējumi. Tāpēc iegūtā vadība jārealizē fāzu plaknē ar atgriezeniskām saitēm.

Apskatīsim dažādas vadības sintēzes pa dažādām galvenajām sintēzes trajektorijām – lineāru, kvadrātisku un kubisku.

Vispārējā gadījumā izsakot sintēzes trajektoriju ātrumam  $V$  kā koordinātes  $X$  funkciju, iegūstam šādus trīs vienādojumus:

1. *Lineārā (taisnes) gadījumā:*

$$V = C_0 + C_1 \cdot X; \quad (14)$$

2. *Kvadrātiskā (parabolas) gadījumā:*

$$V = C_0 + C_1 \cdot X + C_2 \cdot X^2; \quad (15)$$

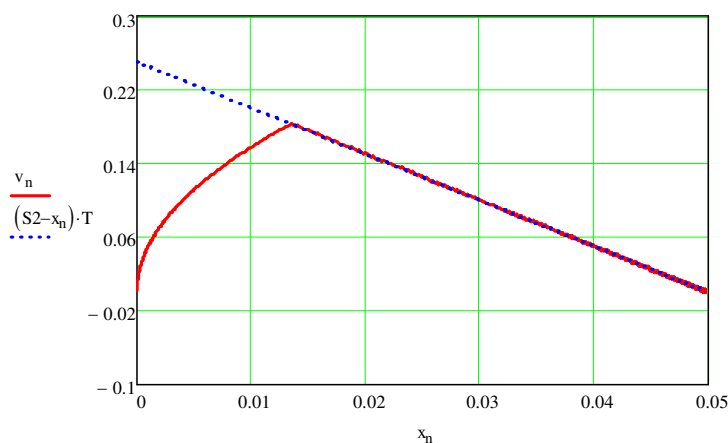
3. *Kubiskā gadījumā:*

$$V = C_0 + C_1 \cdot X + C_2 \cdot X^2 + C_3 \cdot X^3. \quad (16)$$

Koeficientus  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  un  $C_3$  jānosaka katram gadījumam atsevišķi, pieskaņojot tos trajektorijas robežnoteikumiem.

### Pozicionēšanas vadība pa lineāru fāzu trajektoriju

Lineārā gadījumā taisne kustības sākumā pie  $X=0$  sākas ar vērtību  $V(0)$ . Taisnei jābeidzas pozicionēšanas vietā  $S2$ , kad ātrums kļūst negatīvs. Modelēšanā ievērota viskozā pretestība un sausā berze.



6. att. Vadība fāzu plaknē.

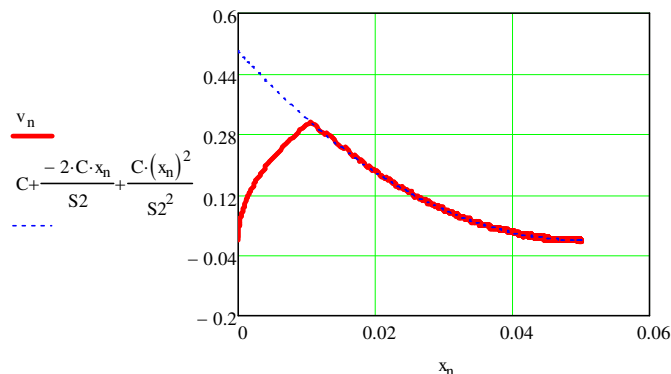
Izpildās sistēmas modeļa nosacījums – sākumā vadība  $u1$  ir maksimāla, tad pārslēdzas uz taisnes skenēšanu. Sistēma ir optimāla.

Vadības funkcija:

$$K_n := u1[\text{sign}[(S2 - x_n) \cdot T - v_n]] \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \text{sign}(v_n))].$$

### Pozicionēšanas vadība pa kvadrātisku fāzu trajektoriju.

Kvadrātiskā gadījumā ar simetrisku vadību taisne kustības sākumā pie  $X=0$  sākas ar vērtību  $V(0)$ . Taisnei jāiet pa parabolu un jābeidzas pozicionēšanas vietā  $S2$ , kad ātrums kļūst negatīvs. Izveidots sistēmas modelis, t.i. izvēlēti modelēšanas parametri, skaitliskās integrēšanas vienādojumi ar sākuma noteikumiem. Modelēšanā ievērota viskozā pretestība un sausā berze.



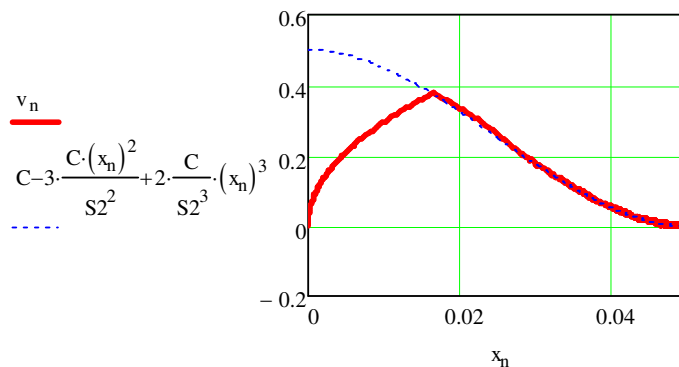
7. att. Vadība fāzu plaknē. Sākumā vadība  $u1$  ir maksimāla, tad pārslēdzas uz ieliekas parabolas skenēšanu.

Vadības funkcija:

$$K_n := u1 \cdot \left[ \text{sign} \left[ \left[ \left[ \frac{-C(x_n)^2}{S^2} + C \right] - v_n \right] \right] \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \text{sign}(v_n)) \right].$$

### Pozicionēšanas vadība pa kubisku fāzu trajektoriju.

Kubiskā gadījumā taisne kustības sākumā pie  $X=0$  sākas ar vērtību  $V(0)$ . Taisnei jāiet pa kubisku parabolu un jābeidzas pozicionēšanas vietā  $S2$ , kad ātrums kļūst negatīvs. Modelēšanā ievērota viskozā pretestība un sausā berze.



8. att. Vadība fāzu plaknē. Sākumā vadība  $u1$  ir maksimāla, tad pārslēdzas uz simetriskas kubiskas parabolas skenēšanu.

Vadības funkcija:

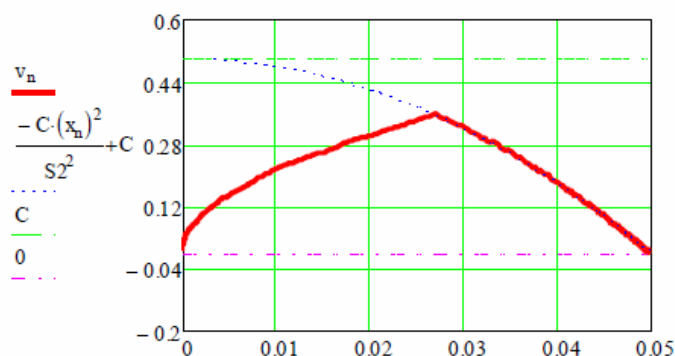
$$K_n := u1 \cdot \left[ \text{sign} \left[ \left[ \left[ \left[ C - 3 \cdot \frac{C(x_n)^2}{S^2} + 2 \cdot \frac{C}{S^2^3} (x_n)^3 \right] - v_n \right] \right] \right] \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \text{sign}(v_n)) \right].$$

## Ceturrtā nodaļa

Šajā sadaļā tiek apskatītas un analizētas pozicionēšanas vadības sistēmas no iepriekšējām sadaļām, t.i. vadības sintēze jauktās (adaptīvās un laika ierosmju) sistēmās pie gadījuma parametriem.

### Vadības sintēze pa lineāru fāzu trajektoriju pie sausās berzes mijiedarbības neholonomā sistēmā.

Izveidots sistēmas modelis. Modelis ar kvadrātisku simetrisku izliektu parabolu ar gadījuma parametriem neholonomā sistēmā. Modelēšanā ievērota viskozā pretestība un sausā berze.



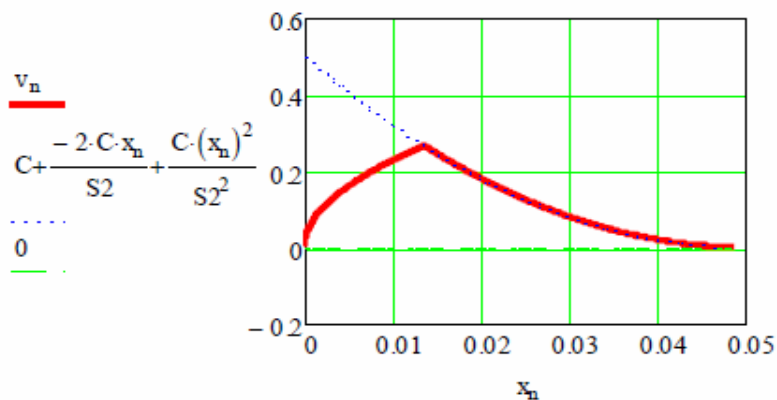
9. att. Vadība fāzu plaknē. Sākumā vadība  $u_1$  ir maksimāla, tad pārslēdzas uz izliektas simetriskas parabolas skenēšanu.

Vadības funkcija:

$$K_n := u_1 \left[ \text{sign} \left[ \left[ \left[ \frac{-C(x_n)^2}{S^2} + C \right] - v_n \right] \right] \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \text{sign}(v_n)) \right].$$

### Vadības sintēze pa bilineāru fāzu trajektoriju pie viskozās berzes pretestības spēka gadījuma parametriem.

Izveidots sistēmas modelis. Modelis ar kvadrātisku simetrisku izliektu parabolu ar gadījuma parametriem. Modelēšanā ievērota viskozā pretestība un sausā berze.



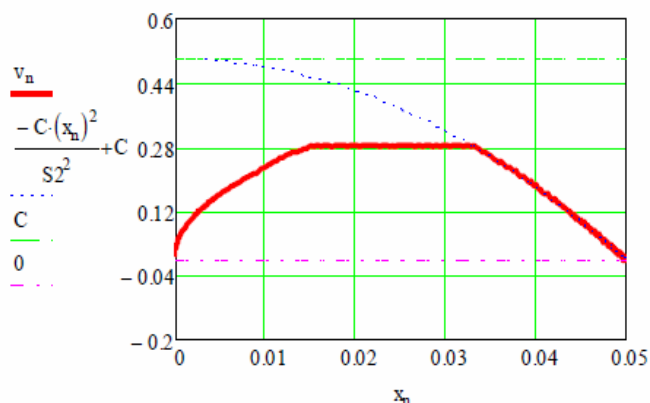
10. att. Vadība fāzu plaknē. Sākumā vadība  $u_1$  ir maksimāla, tad pārslēdzas uz izliektas simetriskas parabolas skenēšanu. Vadība apstājas pie negatīva ātruma.

Vadības funkcija:

$$K_n := u1 \left[ \text{sign} \left[ \left[ \left[ \frac{-C(x_n)^2}{S^2} + C \right] - v_n \right] \right] \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \text{sign}(v_n)) \right].$$

### Vadības sintēze pie polinomiālas pretestības spēka un nestacionāras saites reakcijas mijiedarbības.

Uzmodelēts sistēmas modelis. Modelis ir ar kvadrātisku simetrisku izliektu parabolu ar ātruma ierobežojumu gadījuma parametriem. Modelēšanā ievērota viskozā pretestība un sausā berze.



11. att. Vadība fāzu plāknē. Simetriska vadība  $u1$  sasniedz ar ātruma ierobežojumu, notur konstantu ātrumu līdz iziet uz izliektu parabolas un apstājas kad ātrums kļūst negatīvs.

Vadības funkcija:

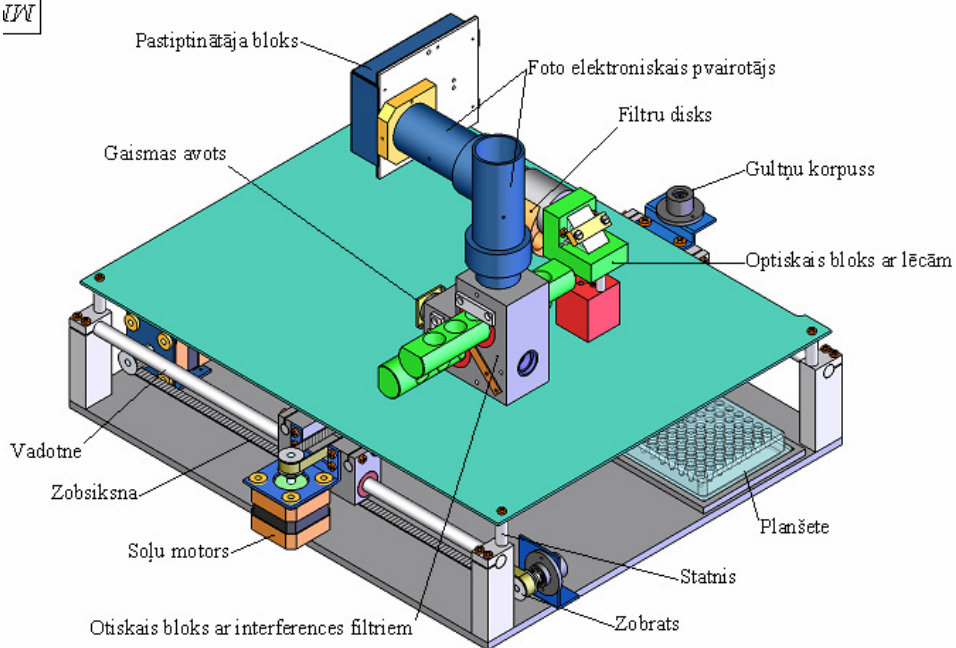
$$K_n := u1 \left[ \text{sign} \left[ \left[ \left[ \frac{-C(x_n)^2}{S^2} + C \right] - v_n \right] \right] \cdot (0.5 + 0.5 \cdot \text{sign}(v_n)) \right].$$

## Piektā nodaļa

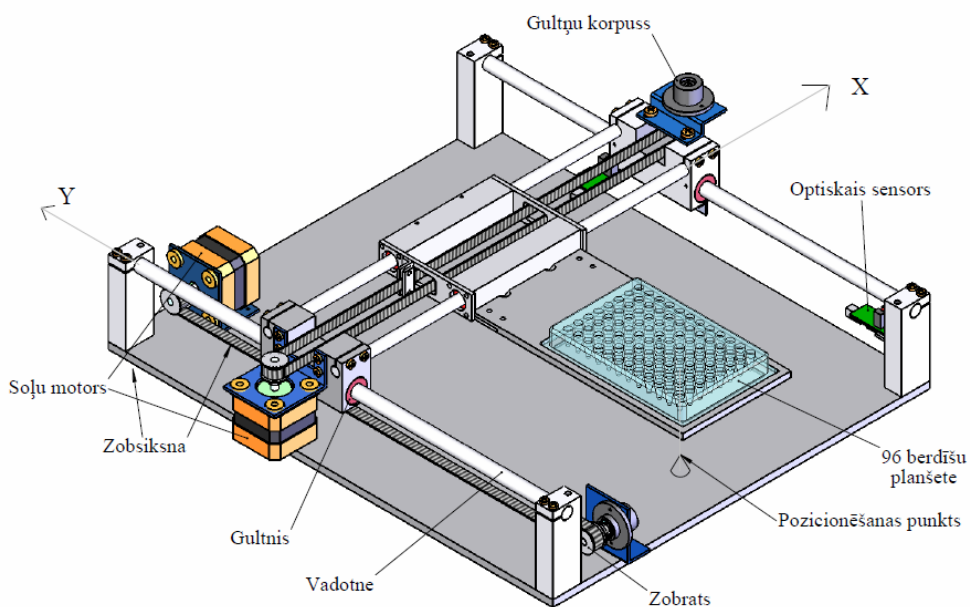
Šī nodaļa ir apvienojums no darba piektajai un sestajai nodaļai, kas ietver reālu pozicionēšanas iekārtu radīšanu un izmēģināšanu. Tika aplūkotas četras iekārtas ar dažādiem vadības uzdevumiem. To pielietojums paredzēts medicīnas laboratorijās analīžu diagnostikas veikšanai. Iekārtām ir sava sarežģītības pakāpe un funkcija. Visas ierīces ir projektētas (Solid Works programmatūrā) un prototipētas no nulles.

- **Pirmā** no aplūkotajām ierīcēm ir **planšetes fluorimetrs** (12. att.).

Fluorimetra kinemātiskās vadības shēma bāzējas kustībā pa X un Y asi (13 att.).

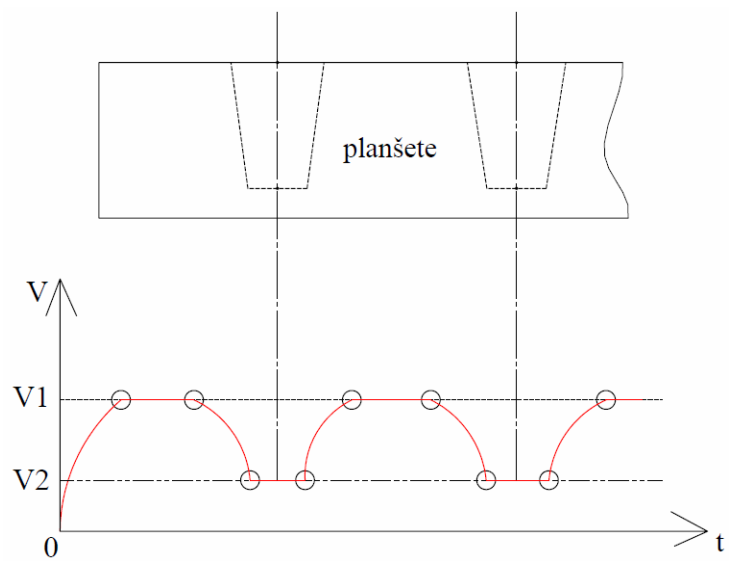


12. att. Fluorimetra iekšējā struktūra



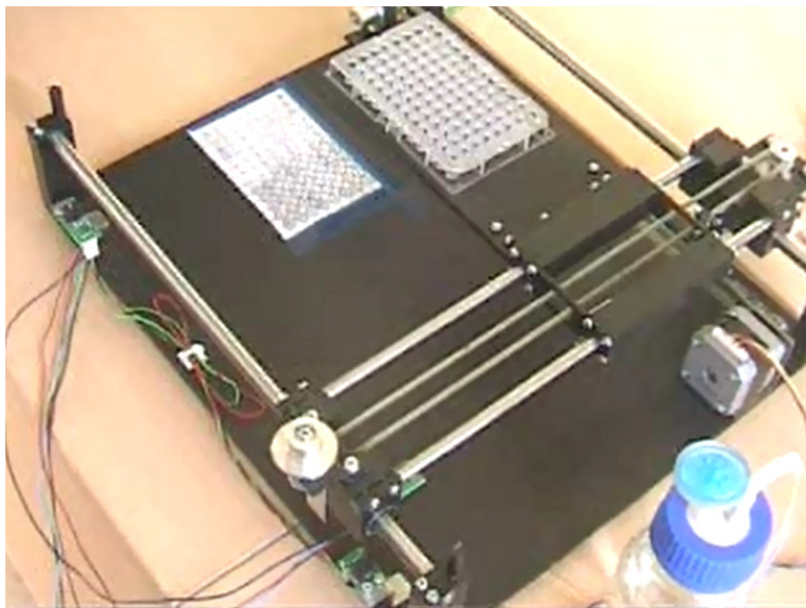
13. att. Fluorimetra vadības kinemātiskā shēma

Kā svarīgākais faktors sistēmas vadībā ir tās robežātrumi: sistēmas ieskriešanās līdz uzdotajam ātrumam  $V_1$ , tad maksimāli strauja bremsēšana līdz otram uzdotajam ātrumam  $V_2$ , un tad cikliski pārslēdzoties starp šiem uzdotajiem ātrumiem (14. att.). Turklāt ejot šo ciklu ir jānodrošina precīza sistēmas vadība: no sākuma punkta pa uz doto trajektoriju jānokļūst gala punktā un tad jāatgriežas uz nulles punktu.



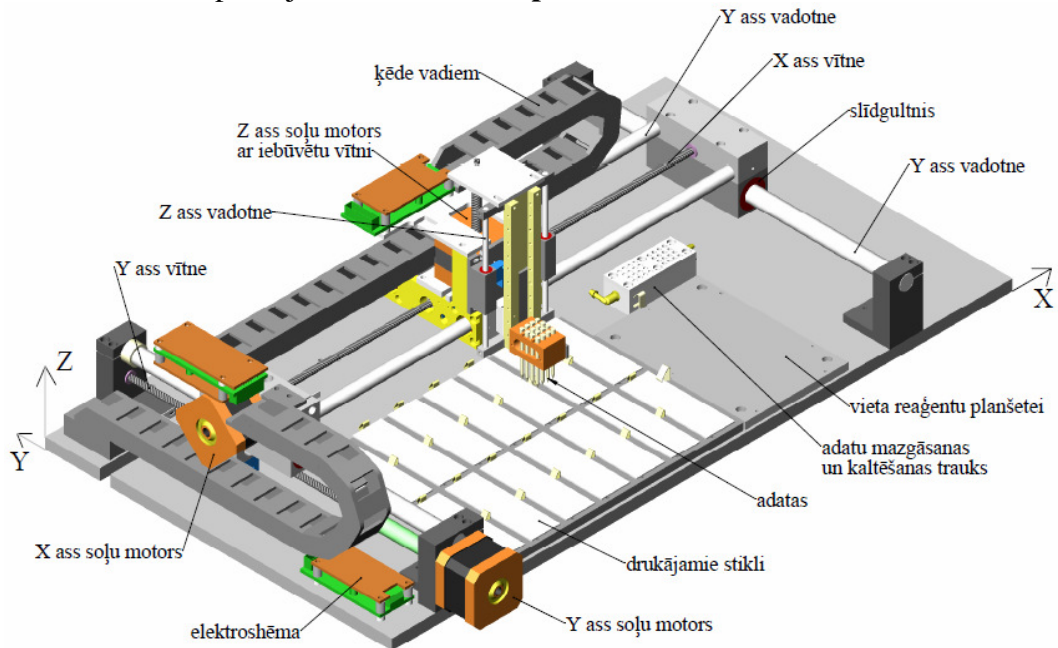
14. att. Fluorimetra vadība

15. attēlā redzams fluorimetra prototips.



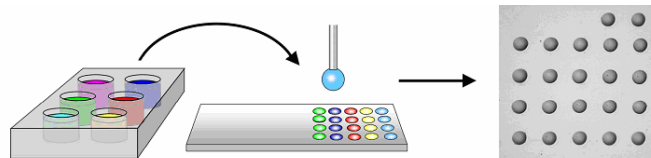
15. att. Planšetes fluorimetra prototips

- Otra aplūkojamā ierīce ir **biočipu robots**.



16. att. Robota kinemātiskā shēma Solid Works vidē

Biočipu robota uzdevums ir dozatora adatā uzņemt etalona oligonukleotīdu un iespiest punktu diametrā, apmēram, 0,15 mm uz stikla pamatnes ar izmēriem 25 x 75 (mm), un ar precizitāti +/-0,01 mm (skatīt 17. attēlā). Katrs šāds punkts ietver sevī informāciju par konkrētu DNS. Uz pamatnes atkarībā no čipa uzdevuma var tikt uzlikti simtiem tūkstošu punktu.



17. att. Čipu iezīmēšana

Attēla 18 redzama izveidotā ierīcē un tās darbības kalibrēšana.



18. att. Robota kalibrēšanas process

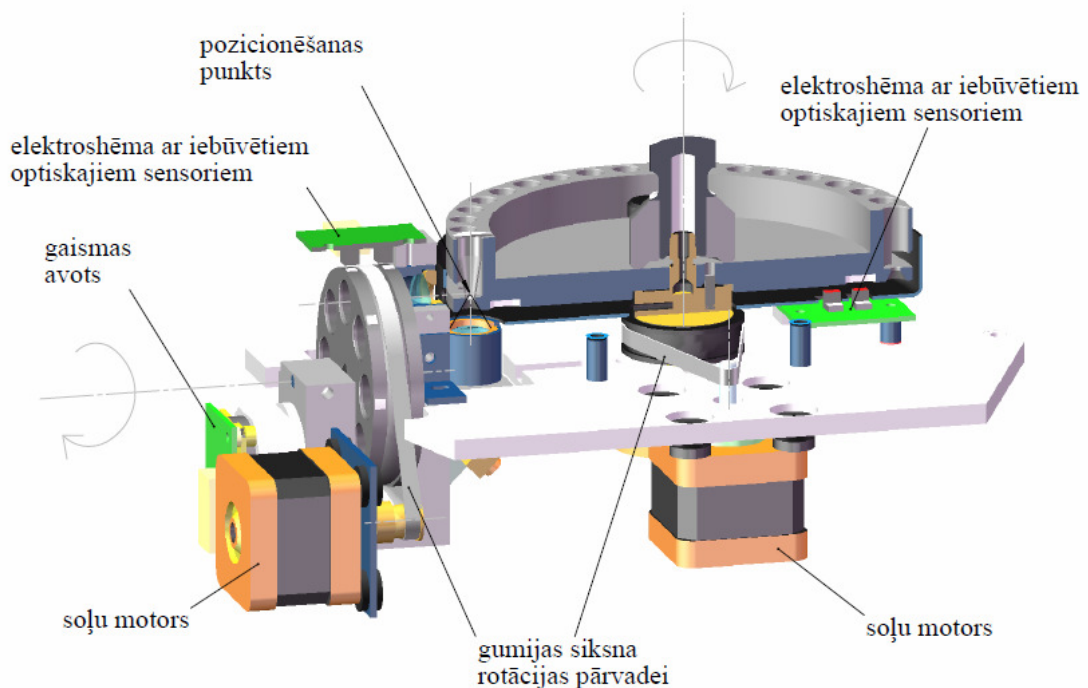
- Kā trešais aplūkotais ir daudzkanālu **fluoriometrs ALA-1/4** (19. att.).

No mehāniskā viedokļa tā darbības princips ir rotācijas kustība un pozicionēšana punktos, to izmantojot. Sarežģītību vadībai piešķir optikas kanāls, caur kuru tiek veikti laboratoriskie mērījumi, tāpēc komponentu nostāšanās vajadzīgajos punktos ir ļoti svarīga.



19. att. ALA-1/4 daudzkanālu fluoriometrs

Galvenais vadības pozicionēšanas bloks parādīts 20. attēlā.



20. att. Fluorimetra kinemātiskā shēma

Ir jāatzīmē kāds ļoti būtisks fakts. Tieši šī ierīce 2010. gadā izpelnījās lielu slavu ar savu inovatīvi, kas arī saņēma nozīmīgu balvu - eksporta un inovācijas balvu 2010.

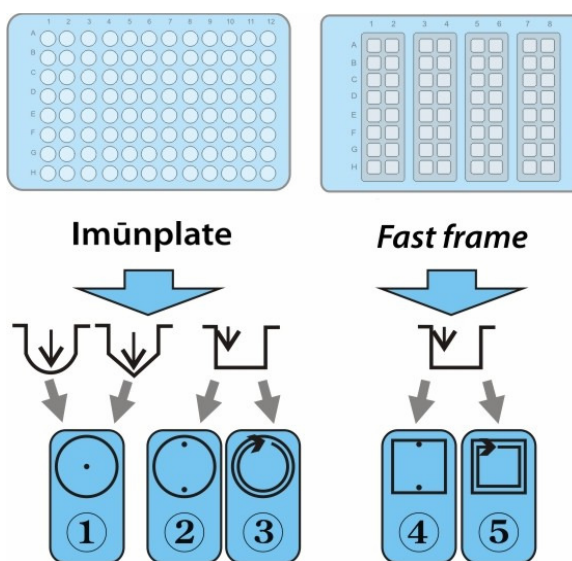
- Visbeidzot **ceturta** palūkotā iekārta ir mikroplašu mazgātājs **Inteliwasher 3D-IW8** (21. attēlā).

Mikroplašu mazgātājs ir ļoti savdabīga iekārta, kas apkopo sevī gan mehāniskās, gan elektriskās, gan šķidrums plūsmas īpašības vienkopus. Turklāt visām trijām lietām jādarbojas mijiedarbība vienai ar otru, kas iekārtas vadību un kontroli padara sarežģītāku.



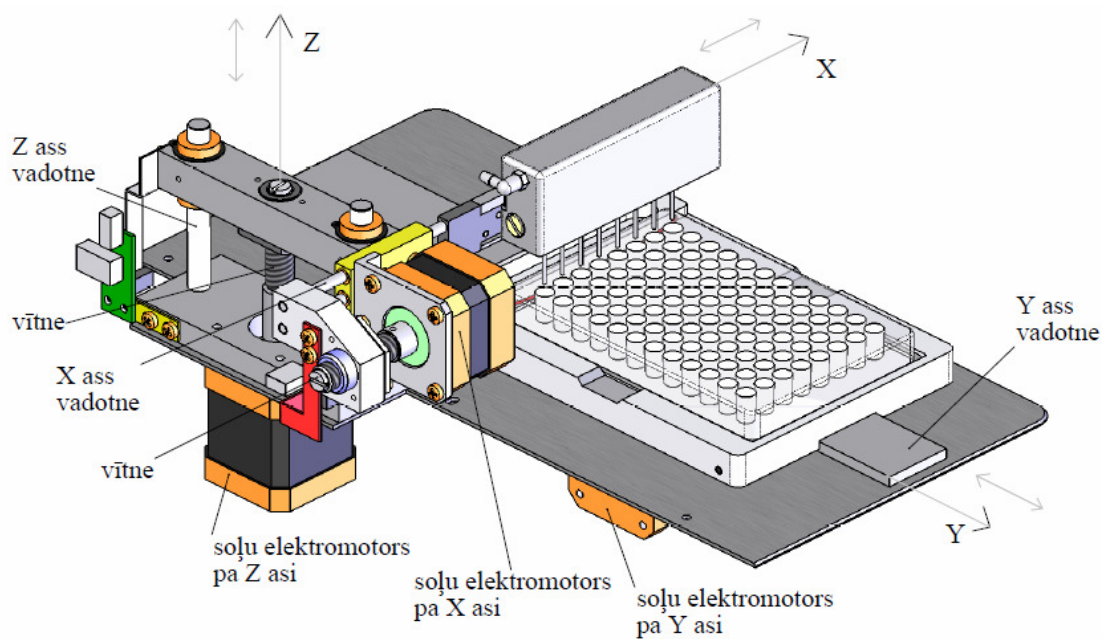
21. att. Inteliwasher 3D-IW8

Tas paredzēts, lai mazgātu dažāda tipa standarta mikrotilpuma plates ar 96 iedobītēm, mikrostripus un mikroplanšetes uz FastFRAME pamata (taisnstūra iedobīšu forma) (skatīt 22. attēlā). Tas ir piemērots, lai mazgātu iedobītes ar dažādu dibena formu: plakānu, U-veida un V-veida. Aparāts ir pilnīgi programmējams, ieskaitot daudz soļu šķidrums nogatavināšanu, nosūkšanu (nosūkšana, nosūkšanas/šķidrums izdalīšanas un mērcēšanas kombinācija, kā arī mērcēšanas cikls noteiktajā laika periodā).

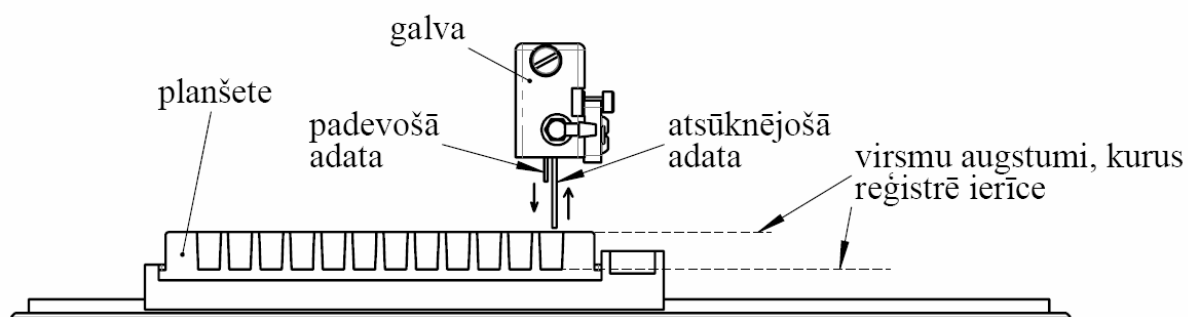


22. att. Aspirācijas veidi

Galvenais mehāniskās sistēmas bloks parādīts 23. attēlā.



23. att. Mazgāšanas mehānisma bloks



24. att. Mazgātāja bloks.

## SECINĀJUMI

1. Uz SIA „Biosan” biočipu projektēšanas bāzes un RTU Mehānikas institūtā izstrādātās optimālās sintēzes teorijas pamata radīta jauna inversa metode pozicionēšanas sistēmu optimālai projektēšanai. Metodē sākotnēji teorētiski izpēta pamat sistēmas vadību, pēc tam uz tās bāzes sintezē sensoru un aktuātoru darbību reālās atgriezenisko saišu sistēmās.
2. Vienkāršāko lēnas gaitas ne trieciena sistēmu pozicionēšanas optimizācijas jomā pilnveidota metode izpildmehānismu (aktuātoru) vadības optimizācijai ar spēka ierosmi. Metodes pamatā ir optimālās spēka vadības atrašanas algoritms, kas ievēro fāzu koordinātu ierobežojumus.
3. Ātrgaitas mehāniskās sistēmās ar sadursmēm izstrādāta jauna metode pozicionēšanas sistēmu vadības optimizācijai ar impulsu ierosmēm. Vadības impulsiem ievēroti ierobežojumi uz impulsu lielumiem un to sekošanas laika intervāliem.
4. Izstrādāta jauna metode pozicionēšanas sistēmu optimizācijā ar jauktu (spēka un impulsa) ierosmi pie kustības ar gadījuma parametriem. Galvenā metodes īpašība ir tā, ka ir divas principiāli atšķirīgas vadības: viena vadība tiek ģenerēta ar spēka ierosmēm, otra vadība tiek realizēta ar sadursmēm pret citiem objektiem. Papildus vadības efektivitāte pārbaudīta, modelējot sistēmas ar gadījuma ierosmēm.
5. Uz programmas MathCad bāzes izstrādātas 6 vadības uzdevumu sintēzes programmas, kuras pielietojamas inženieru sintēzes uzdevumu aprēķinos, realizējot atgriezeniskās saites ar sensoru, aktuātoru un vadības datora palīdzību.
6. Teorētiski sintezētas jaunu biočipu robotizētu izpildmehānismu (aktuātoru) vadības iekārtas, uz kuru bāzes iespējams radīt jaunas ātrdarbīgas pozicionēšanas iekārtas.
7. Ar Solid Works programmatūru izprojektēti un nodoti ražošanā reāli vadības mehānismi un robotizētas iekārtas, kas pārbaudīti eksperimentāli, un, kuri darbojas ASV un citās valstīs.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. E. Lavendelis: Synthesis of optimal vibro machines. Zinatne, Riga, (1970). (krieviski).
2. E. Lavendelis and J. Viba: Individuality of Optimal Synthesis of vibro impact systems. Book: Vibrotechnics”. Kaunas. Vol. 3 (20), (1973). (krieviski).
3. J. Viba: Optimization and synthesis of vibro impact systems. Zinatne, Riga, (1988). (krieviski).
4. E. Lavendelis and J. Viba: Methods of optimal synthesis of strongly non – linear (impact) systems. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Mechanics. Volume 24. Riga (2007).
5. [http://en.wikipedia.org/wiki/Lev\\_Pontryagin](http://en.wikipedia.org/wiki/Lev_Pontryagin). (2008).
6. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pontryagin%27smaximum\\_principle](http://en.wikipedia.org/wiki/Pontryagin%27smaximum_principle).(2008).
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Hamiltonian\\_%28control\\_theory%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Hamiltonian_%28control_theory%29). (2007).

8. V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze and L. S. Pontryagin: On the Theory of Optimum Processes (In Russian), *Dokl. AN SSSR*, 110, No. 1, 7-10 (1956).
9. L. S. Pontryagin, V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze and E.F. Mischenko: (Fizmatgiz). *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, Moscow (1961).
10. L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze, and E.F. Mishchenko: *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, Wiley-Interscience, New York. (1962).
11. V. G. Boltyanskii: *Mathematical Methods of Optimal Control*, Nauka, Moscow. (1966).
12. V.G. Boltyanskii: *Mathematical methods of optimal control: Authorized translation from the Russian*. Translator K.N. Trilogoff. Balskrishnan-Neustadt series. New York. Holt, Rinehart and Winston. (1971).
13. E.B. Lee and L. Markus: *Foundations of Optimal Control Theory*, Moscow: Nauka, (1972). (krieviski).
14. Sonneborn, L., and F. Van Vleck (1965): *The Bang-Bang Principle for Linear Control Systems*, *SIAM J. Control* 2, 151-159.
15. Akinfiiev T., Panovko G., Viba J. Start stop drives with adaptive control. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Mechanics. Volume 7. – Riga: RTU (2002).
16. Craciun S.I., Ardelean I., Csibi V. Considerations regarding of mechatronics systems for positioning in non-destructive testing. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 73. - Romania (2011).
17. Janocha H. *Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications*. - Berlin: Springer - Verlag Berlin Heidelberg (1999).
18. V.P. Chistov, V.I. Bondarenko, V.A. Svatoslavski: *Optimal Control of Electrical Drives*. „Energy”, Moscow. (krieviski).
19. Biochip robot: <http://www.labnext.com/>.
20. Fluorometer: <http://www.biosan.lv/lat/index.php?page=ala-1-4>.
21. 3D-IW8, Inteliwasher: <http://www.biosan.lv/lat/index.php?page=w-8>.
22. [http://www.delfi.lv/bizness/biznesa\\_vidē/izstrada-unikalū-laboratorijas-ierici-infekciju-petisanai.d?id=35640871](http://www.delfi.lv/bizness/biznesa_vidē/izstrada-unikalū-laboratorijas-ierici-infekciju-petisanai.d?id=35640871).
23. Eksporta un inovācijas balvas 2010 uzvarētāji: <http://www.em.gov.lv/em/2nd/?id=31274&cat=621>.
24. Robotizētu iekārtu vadības citējamo materiālu apskats: <http://darbelofflab.mit.edu/?q=node/20>.