

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Anatolijs MEĻNIKOVS**

**METAMODELĒŠANAS PIELIETOJUMS  
KONSTRUKCIJU ELEMENTU FORMAS  
OPTIMIZĀCIJAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2013**

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

**Anatolijs MELNIKOVS**

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un  
mašīnbūve” doktorants

**METAMODELĒŠANAS PIELIETOJUMS  
KONSTRUKCIJU ELEMENTU FORMAS  
OPTIMIZĀCIJAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. sc. ing., profesors  
**A.JANUŠEVSKIS**

**Rīga 2013**

Meļņikovs A. Metamodelēšanas pielietojums  
konstrukciju elementu formas optimizācijai.  
Promocijas darba kopsavilkums. - Rīga: RTU, 2013.-  
31 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Mehānikas  
institūta lēmumu



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

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU  
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI  
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. 29. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes, promocijas padomē „RTU P-04”, Mehānikas institūtā, Ezermalas ielā 6k, 302 auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Prof., Dr.sc.ing. Bruno Grasmanis  
Rīgas Tehniskā universitāte

Prof., Dr.habil.sc.ing. Valerijs Ušakovs  
Informācijas Sistēmu menedžmenta augstskola (ISMA)

Prof., Dr.sc.ing. Andris Martinovs  
Rēzeknes Augstskola

Prof., Dr.habil.sc.ing. Juris Cimanskis  
Latvijas Jūras akadēmija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Anatolijs Meļņikovs .....

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, sastāv no 6 nodaļām, secinājumiem, literatūras saraksta. Darba apjoms ir 143 lappuses, 112 attēli, 13 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 120 nosaukumu.

## SATURA RĀDĪTĀJS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	6
Tēmas aktualitāte.....	6
Darba mērķis.....	6
Pētījuma uzdevumi.....	6
Darba zinātniskā novitāte.....	7
Darba praktiskā vērtība .....	7
Darbā aizstāvamās tēzes.....	8
Veiktā sadarbība ar uzņēmumiem.....	8
Promocijas darba aprobācija.....	8
DARBA SATURS .....	10
Pirmā nodaļa .....	10
Otrā nodaļa.....	12
Trešā nodaļa .....	18
Ceturtā nodaļa .....	20
Piektā nodaļa.....	21
Sestā nodaļa.....	23
SECINĀJUMI.....	24
ZINĀTNISKO PUBLIKĀCIJU UN PATENTU SARAKSTS.....	25
PROJEKTU SARAKSTS.....	29
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	29

# DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Konstrukciju elementu formas optimizācijas problēma jau gadsimtiem ilgi ir bijusi aktuāla. Praktiskā pieredze rāda, ka vienmēr tiek meklēti tādi konstrukciju risinājumi, kuri dod iespēju lietderīgāk izmantot ierobežotos resursus. Pēdējā laikā formas optimizācijas algoritmi [Nocedal, 2006; Christensen, 2009; Deb, 2013] attīstās īpaši intensīvi. Parādās iespējas veikt precīzus aprēķinus sarežģītām konstrukcijām. Tas dod iespēju meklēt gan jaunus „vieglus” materiālus, gan progresīvus risinājumus konstrukciju elementu formai [Bendsoe, 2007; Rao, 2012]. Tomēr klasiskās formas optimizācijas metodēm vēl joprojām ir nepieciešami milzīgi skaitļošanas resursi.

Tāpēc tiek meklētas alternatīvas metodes, ar kurām ir iespējams realizēt formas optimizācijas procedūru pie daudz mazākiem nepieciešamiem resursiem. Pašlaik viens no aktuālākiem virzieniem ir metodes, kuras plaši izmanto parametriskās un neparametriskās aproksimācijas iespējas, līdz ar to daudzkārt samazinot uzdevumu darbietilpību.

Pēdējo 10 gadu laikā vairāku darbu [Simpson 2004; Lee, 2004; 2007; Janushevskis, 2006; Jung, 2006; Koziel, 2011] autori strādā līdzīgā virzienā, cenšoties dot iespējas veikt konstrukciju elementu formas optimizāciju ar nelielu mainīgo skaitu. Tātad darbam izvēlētā tēma šodien ir īpaši aktuāla.

## Darba mērķis

Izstrādāt konstrukciju elementu jaunu formas optimizācijas metodiku, kas ļauj būtiski samazināt projektēšanai nepieciešamos skaitļošanas resursus. Parādīt, ka metodika ir darbaspējīga un pietiekoši efektīva praktisku problēmu risināšanai.

## Pētījuma uzdevumi

Pielietot metamodelēšanas metodi un CAD NURB splineus konstrukciju 3D modeļu formas optimizācijai:

- Atrast efektīvākos paņēmienus formas parametrizācijai un modificēšanai ar NURB splineiem, lai optimizējot objektu būtu iespējams iegūt tikai gludas formas.

- Izstrādāt rekomendācijas eksperimentu plāna tipu un aproksimācijas metožu izvēlei, ar kurām ir iespējams iegūt konstrukciju GE aprēķinu atbilstošu kvalitātīvu aproksimāciju.

- Salīdzināt izstrādātās metodikas efektivitāti ar klasiskajām formas optimizācijas metodēm (homogenizācijas u.c.).

- Izveidot atbilstoši CAD/CAE programmatūrai makrosus, kas automatizētu eksperimentu plānu ievadīšanu un atbilstošu nolāgšanu, lai samazinātu optimizācijas datu sagatavošanas laiku un izvairītos no mehāniskām kļūdām.

- Veikt izstrādātās metodikas pārbaudi uz testa piemēriem. Pārbaudīt optimizācijas rezultātus, veicot atbilstošus naturālos eksperimentus

- Veikt vairāku reālu objektu formas optimizāciju, parādot metodikas praktiskās pielietojšanas apgabala plašumu.

### **Darba zinātniskā novitāte**

Promocijas darba galvenā zinātniskā novitāte ir izstrādātā formas optimizācijas metodika, kura balstīta uz jaunu, iepriekš neizmantoju pieeju: izmantot latīņu hiperkuba (LH) eksperimentu plānus, kas optimizēti pēc vidējās kvadrātiskās distāncē kritērija (MSD), lai iegūtu lokālās aproksimācijas ar Gausa kodolu (metamodeļus) projektējamo konstrukciju rādītājiem kā funkcijas no NURBS daudzstūra atbalsta punktu koordinātēm, kas tiek izmantotas formas uzdošanai.

Izstrādātā metodika ir efektīvi pielietota reālu objektu elementu formas optimizācijai un rezultātā tiek atrasti konkrēti risinājumi un rekomendācijas.

### **Darba praktiskā vērtība**

Izstrādātai metodikai ir plašas izmantošanas perspektīvas, jo tā ir viegli izmantojama (adaptējama) kopā ar dažādām modernajām CAD/CAE programmatūrām (Solidworks, Catia, Ansys, Autocad Inventor uc.). Metodikas galvenais pielietojums ir jaunu oriģinālu konstrukciju elementu formas optimizācija un funkcionālo rādītāju būtiska uzlabošana. Izstrādātā metodika dod iespēju ar daudz mazāku skaitļošanas resursu patēriņu ātrāk atrast konkrēto risinājumu nekā ar alternatīvajām klasiskām metodēm, piemēram, ar homogenizācijas metodi. To ir iespējams efektīvi izmantot mašīnbūves u.c. nozaru visdažādāko ražojumu projektēšanai. Metodikas pielietojuma rezultātā konstrukciju elementi vienmēr tiek iegūti ar gludu, tehnoloģiski viegli realizējamu formu. To apliecina darbā veiktā formas optimizācija un iegūtās rekomendācijas tādiem objektiem kā celtniecības bloks, vilciena riteņpāru

dinamiskās noslodzes mērīšanas aparatūras stiprināšanas disks, autotransporta KMP un tetrapodu konstrukcijas.

### **Darbā aizstāvamās tēzes**

- Uz metamodelēšanas metožu un CAD/CAE programmatūru bāzes izstrādātā jauna skaitļošanas resursus taupoša 3D objektu formas optimizācijas metodika.
- 3D formas parametrizācijas paņēmieni, uzdodot līknes ar NURBS daudzstūra atbalsta punktu koordinātēm, kas nodrošina ar izstrādāto metodiku vislabākos formas optimizācijas rezultātus salīdzinot ar klasiskajām metodēm.
- Ar izstrādātās metodikas palīdzību veikto formas optimizācijas rezultātu adekvātuma pamatojums ar naturālo eksperimentu.
- Celtniecības bloka, vilciena riteņpāru dinamiskās noslodzes mērīšanas aparatūras stiprināšanas diska, autotransporta KMP un tetrapodu konstrukciju optimizēto formu datormodeļi ar iegūtajiem parametriem.

### **Veiktā sadarbība ar uzņēmumiem**

Promocijas darba izstrādes procesā tika veikta sadarbība ar Latvijas uzņēmumiem. Tika risinātas konkrētu objektu optimizācijas problēmas.

Darba 3. nodaļā veikta dzelzceļa vagonu mērīšanas sistēmas elementa konstruktīvās formas optimizācija. Problēma tika saņemta no SIA “Baltijas Testēšanas centrs”.

Darba 5. nodaļā veikta kontroles mērinstrumentu paneļu (KMP) elementu formas optimizācija un dinamikas analīze. Sākotnējie vieglā automobiļa un autobusa KMP ģeometriskie modeļi un tiem izvirzītās prasības tika saņemtas no to ražotājiem SIA “Merpro”.

### **Promocijas darba aprobācija**

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti 21 starptautiskās konferencēs un zinātniskos semināros:

1. Janushevskis A., Melnikovs A., Boiko A. Shape optimization of mounting disk of railway vehicle measurement system. „9th International conference - Vibroengineering 2010” Kaunas, Lithuania, October 14-15, 2010.
2. Янушевскис А.В., Мельников А.Г., Пакалнс Р.Д. Методика оптимизации формы элементов механических систем проектируемых средствами CAD/CAE: тесты. V Международная научно-техническая

- конференция „Современные проблемы машиностроения”. Россия, Томск, 23-26 ноября, 2010.
3. Янушевскис А.В., Мельников А.Г., Бойко А.Ф. Методика оптимизации формы элементов механических систем: промышленные примеры. V Международная научно-техническая конференция „Современные проблемы машиностроения”. Россия, Томск, 23-26 ноября, 2010.
  4. Janushevskis A., Melnikovs A., Auzins J., Gerina-Ancane A., Klimass H. Simulation of Behavior of Vehicle Gage Panel. 10th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, Latvia, Jelgava, 26.-27. May, 2011.
  5. Janushevskis A., Melnikovs A., Auzins J., Boyko A., Gerina-Ancane A. Designing of Automotive Vehicle Gage Panel. // 9th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology - AMST'11. Mali Lošinj, Croatia, 16-17. June, 2011.
  6. Janushevskis A., Auzins J., Gerina-Ancane A., Melnikovs A., Viba J. Multiobjective Optimization of Automotive Vehicle Gage Panel. // Vibration Problems ICOVP 2011. The 10<sup>th</sup> International Conference on Vibration Problems. Czech Republic, Prague, 5-8. September, 2011.
  7. Янушевскис А.В., Мельников А.Г., Гериня-Анцане А.Э. Проектирование корпуса автомобильного щитка. VI Международная научно-техническая конференция „Современные проблемы машиностроения”. Россия, Томск, 28 сентября - 2 октября 2011 года.
  8. Januševskis A., Meļņikovs A. Transportlīdzekļu mērinstrumentu paneļa aprēķini un korpusa kronšteina optimizācija. RTU 52. Starptautiskā zinātniskā konference. Sekcija “Ražošanas tehnoloģija un transports” Apakšsekcija “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve”. Rīga, Latvija, 13. oktobris, 2011.
  9. Januševskis A., Januševskis J., Meļņikovs A., Geriņa-Ancāne A. Plānsienu konstrukciju formas optimizācijas metodika. „Arvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress”. Sekcija ”Tehniskās zinātnes”. Rīga, Latvija, 24. – 27. oktobris, 2011.
  10. Janushevskis A., Auzins J., Melnikovs A., Staltmanis A., Vaicis I., Viba J. Wood Pole Overhead Lines Strength Problems under Extreme Weather Loads // 11th International Scientific Conference „Engineering for Rural Development”, Jelgava, Latvia, 24.-25. May, 2012.
  11. Janushevskis A., Melnikovs A., Gerina-Ancane A, Janusevskis J. Dynamic Analysis of Automotive Gage Panel. 15th International Conference on Experimental Mechanics – ICEM15. Porto, Portugal, 22-27 July, 2012.
  12. Janushevskis A., Melnikovs A., Simanis O., Janusevskis J. Shape Optimization Technique of Objects Designed Using CAD/CAE Riga

- Technical University 53rd International Scientific Conference. Riga, Latvia, 11-12 October, 2012.
13. Janushevskis A., Melnikovs A., Boyko A. Shape Optimization of 3D Mechanical Systems using Metamodels. 2013 International Conference on MEMS and Mechanics MEMS and Mechanics. Wuhan, China, 15-16 March, 2013.
  14. Auzins J., Kalnins K., Labans E., Prieditis R., Melnikovs A. Metamodel building on the basis of globally weighted high order polynomials. WCSMO-10: 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. REF. 5592. Orlando, USA, May 19-24, 2013.
  15. Janushevskis A., Melnikovs A., Janusevskis J. Shape Optimization of a Lightweight Tetrapod Element Using CAD/CAE Tools and Metamodels. IRF 2013 – 4th International Conference on Integrity, Reliability & Failure. Funchal, Portugal, 23-27 June, 2013.
  16. *RTU Mehānikas institūta un LNMK apvienotie semināri (Rīga, Latvija, 13.04.2010., 05.10.2010., 10.05.2011., 19.06.2012., 27.11.2012., 14.04.2013).*
- Galvenie darba rezultāti izklāstīti 28 publikācijās.

## DARBA SATURS

**Pirmajā nodaļā** ir pamatota izvēlētās tēmas aktualitāte, apskatīti NURB splainu formas uzdošanas galvenie paņēmieni, klasiskās formas optimizācijas metodes, jaunākie pētījumi dotā virzienā un problēmas, ar kurām saskaras citi autori. Noformulēts pētījumu mērķis un uzdevumi, kā arī parādītas problēmas, kuras ir nepieciešams atrisināt, lai izveidotā formas optimizācijas metodika būtu efektīva.

Pēdējās desmitgadēs strauji pieaugusi datoru skaitļošanas jauda. Ir attīstījušās galīgo elementu metodes (GEM) pielietojšanas iespējas [Zienkiewicz, 2005], ar kuru tagad var aprēķināt sarežģītas konstrukcijas ar lielu komponentu skaitu, izmantojot mūsdienu personālā datora jaudu. Datorizētā projektēšana (CAD) un datorizēto aprēķinu (CAE) process [Miltiadis, 2010] kļuvis par neatdalāmu etapu jebkura jauna produkta radīšanai. Tas dod iespēju samazināt projektēšanas laiku un ievērojami uzlabot jauno produktu kvalitātes rādītājus. Tomēr uz CAD/CAE bāzētam klasiskas formas optimizācijas metodēm vēl ir nepieciešams liels mainīgo skaits, lai kvalitatīvi veiktu sarežģītas konstrukcijas formas optimizāciju [Vanderplaats, 2004].

Topoloģijas datorizētās optimizācijas metodes sāka izmantot 1988. gadā, lai samazinātu konstrukcijas elementu masu. Tiek izmantotas dažādas homogenizācijas metodes realizācijas [Arora, 2004; Bendsoe, 2007] konstrukciju topoloģijas un formas optimizācijai. No tā laika metode strauji

attīstās un rod plašu pielietojumu. Metode dod ļoti efektīvus risinājumus čaulveida objektiem un atļauj realizēt topometrijas [Mozumder, 2011] un topogrāfijas [Vanderplaats, 2004], izmēra, formas un brīvformas optimizāciju. Tomēr tās ir laika ietilpīgas procedūras. Komerciālā programmatūra Genesis [Genesis, 2007], kurā homogenizācijas metode ir realizēta, atļauj izmantot līdz pat 2,5 miljoniem optimizācijas parametru. Tas dod iespēju atrast tādu sarežģītu objektu kā automobiļu virsbūvju, raķešu korpusu, utml. optimālo topoloģiju. Taču masīvu ķermeņu gadījumā metodes galvenais trūkums ir bieži vien tehnoloģiski grūti realizējamas robainas objekta formas iegūšana un milzīgais darbietilpīgums.

Formas optimizācijas alternatīvā pieeja ietver metamodelēšanas pielietojumu, kas bāzējas uz eksperimentu plānošanas un aproksimācijas metožu izmantošanu [Montgomery, 2001]. Šajā gadījumā, izmantojot nelielu optimizācijas parametru skaitu, ir iespējams atrast optimālo risinājumu [Liao, 2007; Lee, 2004]. Rezultātā nav nepieciešama milzīga rēķināšanas jauda, jo tiek izveidots objekta vienkāršots, bet tomēr augstas kvalitātes metamodelis.

Šodien CAD vidē sarežģītu formu uzdošanai vispiemērotākās ir NURBS līknes, jo tām ir vairākas labas īpašības - tādas kā lokālās modificēšanas iespējas pie dažādas kārtas nepārtrauktības starp līknes segmentiem, gluda forma u.c.

CAD/CAE programmatūrās bieži tiek izmantota kubiskā polinomiālā splainu līkne [Saxena, 2005]. Definēsim to, kā funkciju  $\phi(t)$ , tad  $i$ -jā intervālā  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$  matricu formā tā var tikt pierakstīta:

$$\Phi_i(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(t_{i+1} - 3t_i)t^2_{i+1}}{h_i^3} & \frac{(3t_{i+1} - t_i)t^2_i}{h_i^3} & \frac{-t_it_{i+1}^2}{h_i^2} & \frac{-t^2_it_{i+1}}{h_i^2} \\ \frac{6t_it_{i+1}}{h_i^3} & \frac{-6t_it_{i+1}}{h_i^3} & \frac{(2t_i + t_{i+1})t_{i+1}}{h_i^2} & \frac{(t_i + 2t_{i+1})t_i}{h_i^2} \\ \frac{-3(t_i + t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{3(t_i + t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{-(t_i + 2t_{i+1})}{h_i^2} & \frac{-(2t_i + t_{i+1})}{h_i^2} \\ \frac{h_i^3}{2} & \frac{h_i^3}{-2} & \frac{h_i^2}{1} & \frac{h_i^2}{1} \\ \frac{h_i^3}{h_i^3} & \frac{h_i^3}{h_i^3} & \frac{h_i^2}{h_i^2} & \frac{h_i^2}{h_i^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

kur  $s_i$  un  $s_{i+1}$  ir nezināmie slīpumi un  $y_i$  un  $y_{i+1}$  ir koordinātes pie  $t_i$  un  $t_{i+1}$  (splaina mezgla punktu abscisas);  $n$  – mezgla punktu skaits un  $h_i$  ir splaina  $i$ -tā intervāla garums pa abscisas asi starp diviem blakus mezgliem, ja splaina intervāli nav normalizēti ( $h_0 \neq h_i \neq \dots \neq h_{n-1} \neq 1$ ).

Diferencējot (1) divas reizes, iegūstam:

$$\Phi_i''(t) = \begin{bmatrix} \frac{6(2t - t_i - t_{i+1})}{h_i^3} & -\frac{6(2t - t_i - t_{i+1})}{h_i^3} & \frac{2(3t - t_i - 2t_{i+1})}{h_i^2} & \frac{2(3t - 2t_i - t_{i+1})}{h_i^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ s_i \\ s_{i+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Phi_{i-1}''(t) = \begin{bmatrix} \frac{6(2t - t_{i-1} - t_i)}{h_{i-1}^3} & -\frac{6(2t - t_{i-1} - t_i)}{h_{i-1}^3} & \frac{2(3t - t_{i-1} - 2t_i)}{h_{i-1}^2} & \frac{2(3t - 2t_{i-1} - t_i)}{h_{i-1}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i-1} \\ y_i \\ s_{i-1} \\ s_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Lai nodrošinātu otrās kārtas nepārtrauktību, jāizmanto sakarība  $\phi''_{i-1}(t_1) = \phi''_i(t_i)$  mezgla punktā  $(t_i, y_i)$ :

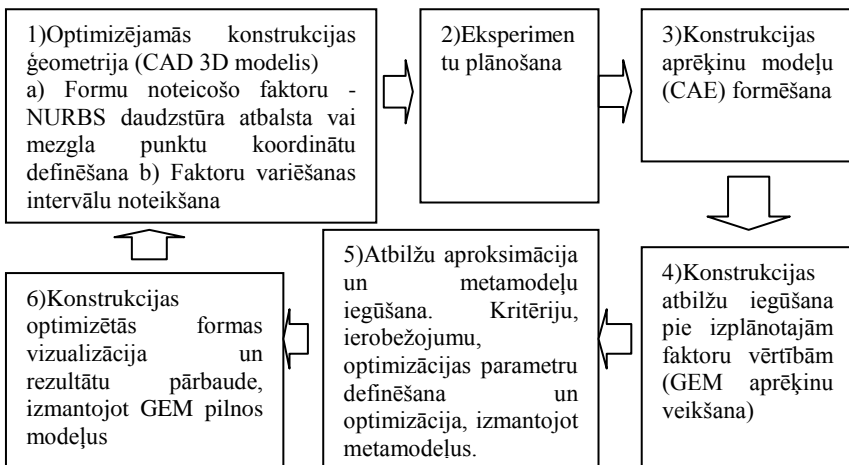
$$\frac{s_{i-1}}{h_{i-1}} + 2s_i \left( \frac{1}{h_{i-1}} + \frac{1}{h_i} \right) + \frac{s_{i+1}}{h_i} = \frac{3y_{i+1}}{h_i^2} + 3y_i \left( \frac{1}{h_{i-1}^2} - \frac{1}{h_i^2} \right) - \frac{3y_{i-1}}{h_{i-1}^2}, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (4)$$

Izstrādājot jaunu formas optimizācijas metodiku, nepieciešamajiem aprēķinu resursiem jābūt pēc iespējas mazākiem. Jaunajai formas optimizācijas metodikai jābūt realizējamai, izmantojot personālā datora resursus, un tai jānodod rezultātus ar pietiekošu precizitāti.

**Otrajā nodaļā** izstrādāta alternatīva metodika konstrukciju elementu formas optimizācijai, izmantojot metamodeļus. Metodika paredz NURBS līknes daudzstūra atbalsta vai mezgla punktu koordinātu izmantošanu konstrukcijas elementa formas uzdošanai, to izvietojuma plānošanu, metamodeļu būvēšanu un pielietojumu optimizācijai. Tiek apskatītas tikai konstrukcijas elementa gludas formas, kuras uzdotas ar NURBS. Negludas formas netiek apskatītas un ir izslēgtas no optimizācijas procesa. Metodika paredz komerciālās CAD programmatūras, kā arī RTU izstrādātās programmas EDASOpt eksperimentu plānošanai, metamodeļu būvēšanai un pielietojumu optimizācijai.

Metodika iekļauj sekojošus 6 etapus, kuri shematiski parādīti att. 1. Pirmajā etapā tiek definēti konstrukcijas optimizācijas parametri, to skaits un diapazoni. Pētāmo objektu mainīgās formas uzdošanai paredzēts izmantot ar nevienmērīgiem racionālajiem B-splainiem (NURBS) iegūtas līknes. Par neatkarīgajiem variējamiem parametriem tiek izmantotas NURBS daudzstūra atbalsta vai mezgla punktu koordinātes. Parametru diapazonus izvēlas, ievērojot tādus faktorus kā optimizējamā elementa vai mezgla izmēru ierobežojumus, masas ierobežojumu, tehnoloģiskos ierobežojumus vai kādus citus svarīgus ierobežojumus. Parametru diapazoniem jābūt tādiem, lai

iespējamais optimālais risinājums atrastos tā robežās, citādi optimizāciju vajadzēs atkārtot ciklā, koriģējot parametru diapazonus. Otrajā etapā saskaņā ar parametru skaitu un diapazoniem ar programmatūru EDAOpt tiek ģenerēts eksperimentu plāns. Priekšroka tiek dota LH eksperimentu plāniem sarēķinātiem pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija (MSD). Trešajā etapā tiek veikta objekta formas ģeometriskā modeļa būvēšana ar CAD līdzekļiem saskaņā ar eksperimenta plānu. Šajā etapā ir iespējams piefiksēt katra modeļa tilpumu, masu un citus inerciālos rādītājus, kuri optimizācijas 5. etapā varētu būt izmantoti. Ceturtajā etapā tiek veikti objekta GEM pilnā modeļa atbilžu aprēķini ar CAE programmatūru. GE modelim jānodrošina pietiekoša meklējamo atbilžu precizitāte. Piektajā etapā tiek veikta atbilžu aproksimācija ar lokālām polinomiālām funkcijām ar Gausa kodolu programmatūrā EDAOpt. Tiek novērtēta aproksimācijas precizitāte, aprēķinātas prognozēšanas kļūdas. Ja rezultāti ir apmierinoši, tad pie uzdotajiem zināmiem ierobežojumiem (masa, tilpums, spriegumi, pārvietojumi, deformācija un citi) tiek meklēti mērķa funkcijas ekstrēmumi ar globālajām stohastiskajām optimizācijas metodēm. Sestajā etapā atrastie optimizācijas parametri tiek izmantoti, lai izveidotu objekta 3D modeļa optimālo formu CAD programmatūrā. Tālāk optimālā forma tiek pārbaudīta, izmantojot objekta pilno GEM modeli. Aprēķināto pilnā GEM 3D modeļa atbilžu salīdzināšana ar iepriekš ar metamodeļiem iegūtajiem rezultātiem, kļūdu novērtēšana.



1. att. Formas optimizācijas metodikas pamatetapi

Lai automatizētu lietotāja darbības 3-5 etapos, proti, EDASOpt eksperimentu punktu ievadīšanu un atbildes nolasišanu, ir izveidots speciāls Visual Basic makross programmatūrai SolidWorks.

Vairums tālāk apskatīto objektu gadījumos labāko atbildes aproksimāciju ir iespējams iegūt, izmantojot otrās kārtas polinomiālo aproksimāciju, kura tiek meklēta sekojošā formā:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{d-1} \sum_{j=i+1}^d \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^d \beta_{ij} x_i^2 + \varepsilon, \quad (5)$$

kur  $d$  mainīgajiem  $x_1, \dots, x_d$  ir  $L=(d+1)(d+2)/2$  nezināmi koeficienti  $\beta$  un pieņemts, ka gadījuma kļūdas  $\varepsilon$  ir neatkarīgas ar normālo sadalījumu, nulles vidējo vērtību un konstantu dispersiju  $\sigma^2$ . Lokālās aproksimācijas gadījumā koeficienti  $\beta=(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_L)$  ir atkarīgi no punkta  $x_0$ , kurā tiek rēķinātas prognozēšanas vērtības, un to iegūšanai tiek izmantota svērtā mazāko kvadrātu metode:

$$\beta = \arg \min_{\beta} \sum_{j \in N_x} w(x_0 - x_j) \times (y_j - \hat{y}(x_j))^2, \quad (6)$$

kur  $N_x$  apkārtējo punktu nozīmīgums tiek izvērtēts ar Gausa kodolu:

$$w(u) = \exp(-\alpha u^2), \quad (7)$$

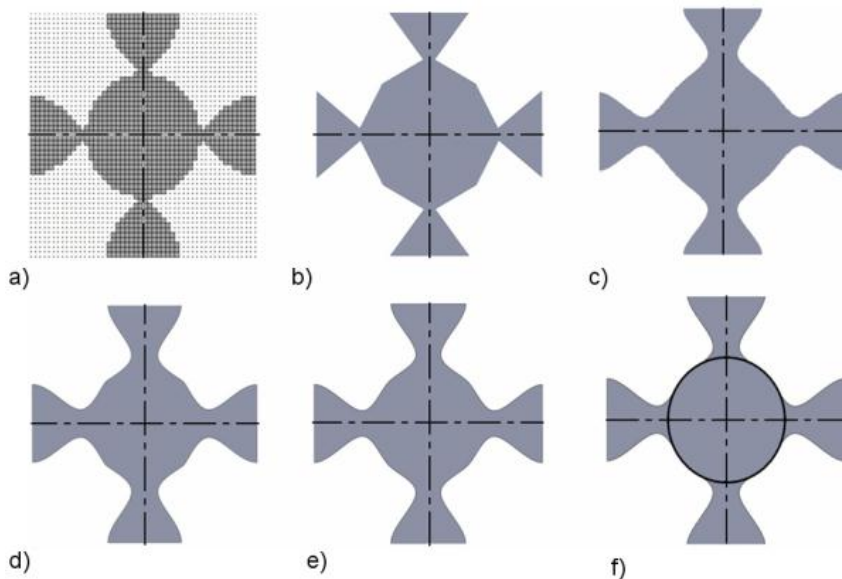
kur  $u$  ir Eiklīda distance no  $x_0$  līdz tekošajam tuvākam eksperimentu plāna punktam un  $\alpha$  ir koeficients, kurš nosaka tuvākā punkta svarīgumu.

Aproksimācijas kvalitāte tiek novērtēta ar krosvalidācijas kļūdu:

$$\sigma_{Xrel} = 100\% \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_{-i}(x_i) - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (8)$$

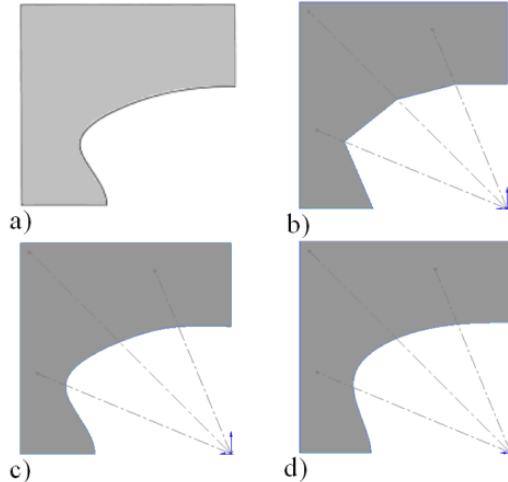
kur skaitītājā ir prognozes vidējā kvadrātiskā kļūda starp aproksimācijā iegūtajiem un ar GEM aprēķinātajiem rezultātiem, bet saucējā ir atbildes

novirze no tās vidējās vērtības;  $n$  ir pārbaudes punktu skaits un  $\sum_{i=1}^n \hat{y}_{-j}(x_i)$  apzīmē atbilžu summēšanu, nelietojot atbildes vērtību  $j$ -tajā punktā.

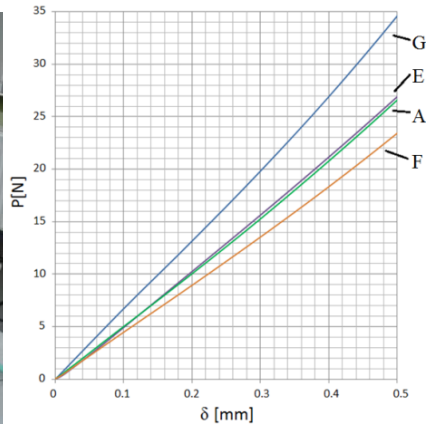


2. att. Liektas plāksnītes izgriezuma iegūtās formas: a) ar homogenizācijas metodi [Liang,2001]; b) punkti savienoti ar taisnēm; c) ar NURBS mezgla punktiem; d) ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem un e-f) optimizējot “d” variantam sākuma un beigu atbalsta punktu nepārtrauktības vektorus

Tālāk izstrādātā formas optimizācijas metodika tiek pārbaudīta uz divu testa uzdevumu bāzes. Pirmajā uzdevumā ir optimizēta plāksnītes forma pie lieces sloģojuma un pārvietojuma ierobežojumiem, bet otrajā – pie stiepes divasu sloģojuma un ekvivalento spriegumu ierobežojuma. Iegūtās optimālās formas ( att. 2 un 3) tiek salīdzinātas ar citu autoru darbos [Papadrakakis, 1998; Liang, 2001] iegūtajām. Tiek analizēta trīs formas uzdošanas paņēmieni efektivitāte. Parādīts, ka, izmantojot izstrādāto metodiku un uzdodot formu ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem, var iegūt labākus optimizācijas rezultātus nekā ar darbietilpīgo homogenizācijas metodi.



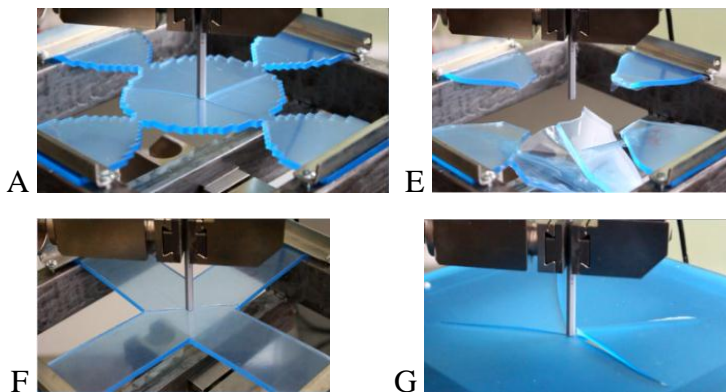
3. att. Liektas plāksnītes izgriezuma iegūtās formas: a) Papadrakakis, 1998; b) punkti savienoti ar taisnēm; c) ar NURBS mezgla punktiem un d) ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem



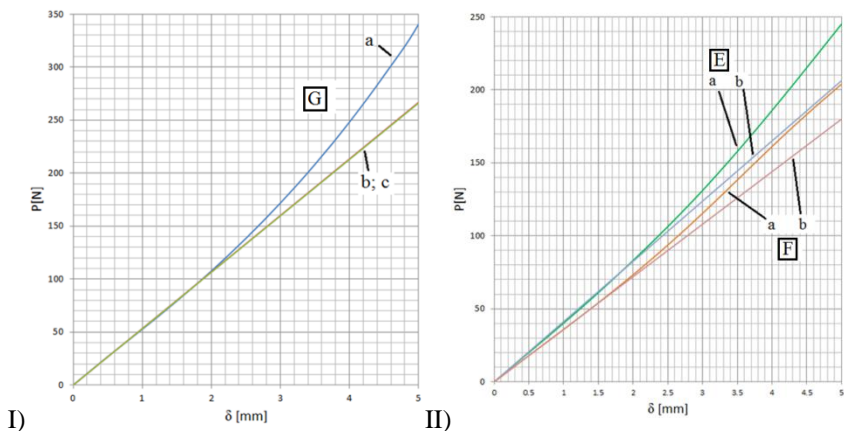
4. att. Liektas plāksnītes fizikālie eksperimenti uz Zwick Roell Z 150 testēšanas mašīnas un aprēķinātās vidējo vērtību (Vid) līknes katram paraugam: [Liang, 2001] (A), optimālā forma, kas iegūta ar izstrādāto metodiku (E), grieķu krusts (F) un kvadrātiska plāksnīte (G)

Lai pilnīgi pārliecinātos, ka uz datoraprēķiniem bāzētā metodika ir darbaspējīga un to var izmantot reālu konstrukciju formas optimizācijai, veikta

pirmā testa piemēra – liektas plāksnītes ar optimālo formu validācija ( att. 4 pa kreisi). Eksperimentiem tika sagatavoti 13 paraugi: A forma – 1 gab., E – 4 gab. , F – 4 gab. un G – 4 gab (att. 5). Izmantojot eksperimentos piefiksētos datus, tiek sarēķinātas vidējo vērtību līknes katram paraugam (att. 4 pa labi)).



5. att. Paraugi pēc sabrukšanas



6. att. Līknes, kas iegūtas, aprēķinot vidējo aritmētisko no eksperimentu datiem un ar izveidotiem lineāriem modeļiem: I) paraugam G: a- eksperiments; b – GE un c – analītiskais; II) paraugiem E un F: a- eksperiments; b- GE

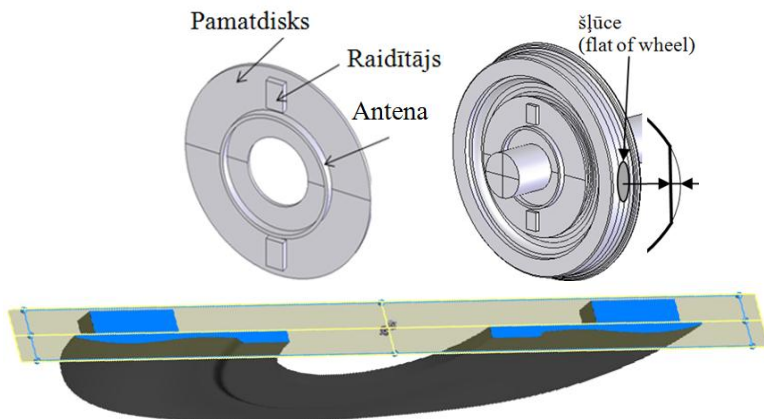
Fizikālo eksperimentu, GEM un analītisko rezultātu salīdzinājums paraugiem G ir parādīts att. 6(I). Iegūta laba sakritība elastīgo deformāciju

sākuma posmam (apmēram līdz 2.2 mm) visām 3 līknēm. GE modelis un analītiskais modelis sakrīta 0.2 % kļūdas robežās.

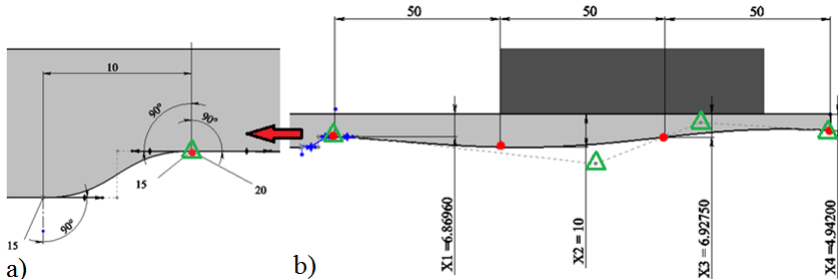
Paraugiem (E un F) izveidotie GEM modeļi un rezultāti salīdzināti att. 6(II). Novērota sakrītība līdzīga paraugam G noslodzes posma sākumā līdz 2.2 mm. Līdz ar to naturālie eksperimenti apstiprināja, ka optimizācijas aprēķinu rezultātā iegūtajai plāksnītei (att. 2e) ir optimālais materiāla sadalījums.

**Trešajā nodaļā** risināta mērīšanas aparatūras diska formas optimizācijas problēma.

Mūsdienās sistēmas „riteņpāris – sliede” monitoringam izmanto speciālus tenzometriskos riteņpārus. Katram ritošā sastāva pārbaudāmās vienības tipam (elektrovilciens, dīzeļvilciena vagoni vai lokomotīve) jāizgatavo speciālu tenzometrisko riteņpāri, jo ir nepieciešama atbilstība pēc diametra (riteņa velšanās virsmas nodilums) un pēc nostiprināšanas veida (bukses mezgla konstrukcija). Speciālu tenzometrisko riteņpāru izmantošana un piegāde uz izmēģinājumu vietu prasa ievērojamus materiālos izdevumus, kā arī palielina gaitas dinamisko un stiprības izmēģinājumu sagatavošanas laiku. Lai vienkāršotu izmēģinājumu sagatavošanu, tenzometriskā riteņpāra vietā tiek piedāvāts izmantot uz ritošā sastāva jau esošo (štata) riteņpāri. Par prototipu ir pieņemts maināmais aprīkojums, kas paredzēts 80 tonnu kravas vagona riteņpārim. Noņemamā mērīšanas aparatūra (7. att.) iekļauj disku, divus raidītājus, magnētisko antenu [Григоров, 2005] un tenzodevējus, kuri tiek piestiprināti noteiktās riteņpāra vietās.



7. att. Noņemamais disks ar mērīšanas aparatūru, tā uzstādīšanas vieta un atrastās optimālās formas eliptiskā diska šķērsriezums



8. att. Eliptiskā diska šķērs griezuma formas definēšana ar NURBS: a) nepārtrauktības definēšana un b) formas uzdošana ar daudzstūra atbalsta (zaļie trīsstūri) vai mezgla punktiem (sarkanie punkti)

Ir nepieciešams samazināt noņemamās aparatūras masu, lai izvairītos no tenzodevēju signālu kropļojuma, bet tai pašā laikā aparatūrai jābūt drošai, jo slodzes no tādiem ceļa negludumiem kā sliežu salaidumi un sliežu pārmijas, kā arī no riteņpāru formas defektiem (šļūces) tiek nodotas uz riteņpāri un noņemamo disku, kas cieši nostiprināts uz riteņpāra ass, var būt ievērojamas. Tāpēc, lai nodrošinātu mērīšanas sistēmas noņemamā aprīkojuma drošu ekspluatāciju, ir veikta smagākā aparatūras komponenta – noņemamā diska formas optimizācija tā masas samazināšanai.

Lai būtu iespējams iegūt plašāku priekšstatu, tāpat kā testa plāksnīšu gadījumos, izmantoti 3 formas uzdošanas paņēmieni (att. 8b): 1) ar NURBS mezgla punktiem; 2) ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem un 3) ar punktiem, kuri ir savienoti ar taisnēm. Diska mainīgā šķērs griezuma forma tiek uzdots ar 4 punktu vertikālajām koordinātēm. Lai iegūtu eliptiskā diska šķērs griezumam gludu formu un izvairītos no iespējamām spriegumu koncentrācijām šajās vietās, variantiem „1” un „2” tiek definēti NURBS 3 nepārtrauktības vektori (att. 8a).

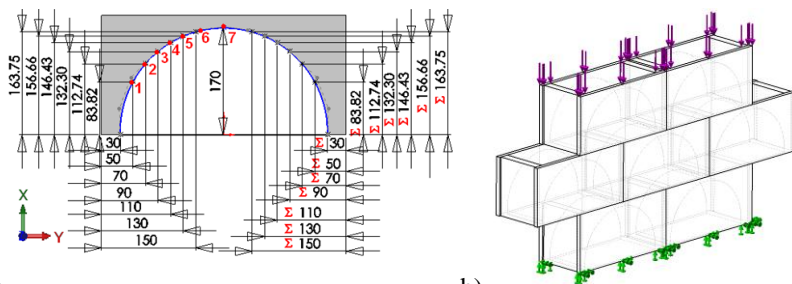
Diska optimizācijas problēma tiek definēta sekojoši: minimizēt diska tilpumu  $V$  pie ierobežojumiem a) uz eliptiskā diska maksimāliem ekvivalentiem spriegumiem  $\sigma_{vonMises} \leq 4 \text{ MPa}$ , b) uz pārvietojumiem aksiālā virzienā  $U_z < 2 \text{ mm}$  un c) uz pirmo pašsvārstības frekvenci  $f > 25 \text{ Hz}$ .

Atrastās eliptiskā diska šķērs griezuma formas īpatnības tiek parādītas att. 7. Ir redzama vieta zem raidītāja, kur diska biezums ir lielāks, jo šai apgabālā tiek uzņemtas papildus slodzes.

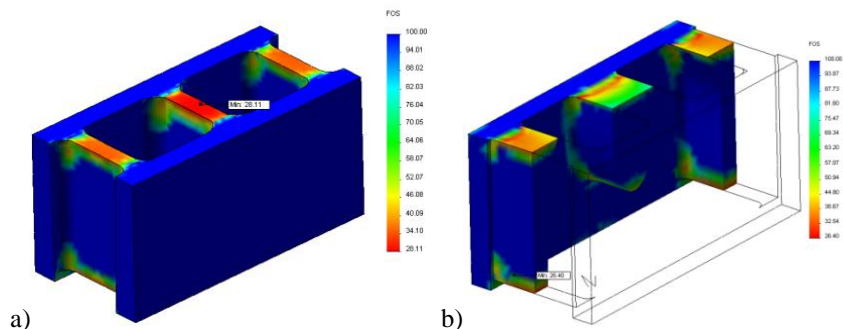
Optimizācijas rezultātā, noņemamā diska svārs ir samazināts par ~64%, salīdzinot ar sākotnējo konstrukciju. Izveidots eliptiskas formas disks ar mainīgu biezumu, kuram ir nepieciešamā stiprība, pieļaujamie pārvietojumi un pašfrekvences.

**Ceturtajā nodaļā** tiek risināta laba betona bloka formas optimizācijas problēma. Tiek parādīts, ka izstrādātai metodikai ir plašs pielietojums un tā nav ierobežota tikai ar plastisku materiālu objektu optimizāciju.

Tiek meklēta laba betona bloka izgriezuma forma, izvērtējot materiālu izlietojumu no stiprības un siltumizolācijas viedokļiem. Kā bloka termomodelis kalpo viens bloks, kurā ievērtēta bloka materiālu siltumvadāmība un konvekcijas process uz bloka āršienas. Kā bloka stiprību aprakstošie modeļi kalpo viena bloka modelis ar dažādiem robežnoteikumiem un dažāda mūrējuma sienu modeļi, piemēram att. 9b. Bloka stiprība definēta ar Mora-Kulona kritēriju.



a) b)  
9. att. a) Izgriezuma bāzes formas izmēri un b) Aprēķinu modelis ar nobīdītiem blokiem



a) b)  
10. att. FOS koeficienta vērtību sadalījums a) Columbia Kivi un b) blokam ar alternatīvo izgriezuma formu

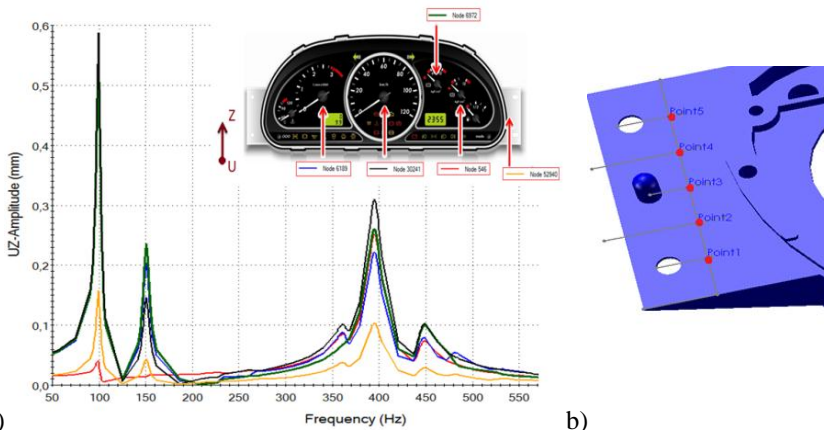
Bloka izgriezuma forma tiek uzdota ar gludu NURBS līkni, kuru savukārt definē ar 7 NURBS daudzstūra atbalsta punktu palīdzību ( att. 9a). Optimizācija tiek veikta, ievērojot svarīgākos kritērijus. Risināti sekojoši nelineārās programmēšanas uzdevumi: 1) maksimizēt bloka minimālo drošības

koeficientu pie ierobežojuma uz mūra iekšējās sienas minimālo vidējo temperatūru, 2) maksimizēt bloka iekšējās sienas vidējo temperatūru, 3) minimizēt bloka masu un 4) maksimizēt bloka minimālo drošības koeficientu. Par iekšējās sienas vidējo temperatūru tika pieņemts vidējais aritmētiskais no temperatūras vērtībām visos mezgla punktos, kas izvietoti uz bloka sienas.

Optimizācijas rezultāti parādīja, ka ir iespējams samazināt bloka masu par ~8%, izmantojot atrasto alternatīvā bloka izgriezuma formu (att. 10).

**Piektajā nodaļā** veikta KMP dinamikas analīze un metodikas pielietojums vieglā automobiļa un autobusa KMP kronšteinu formas optimizācijai.

KMP jāapmierina vairākas svarīgas prasības: pieļaujamo spriegumu līmenis, stinguma, masas un precizitātes raksturojumi, kā arī tā dzīves ciklam jābūt ar minimālu negatīvo ietekmi uz apkārtējo vidi. Izstrādāti 3D ģeometriskie KMP modeļi, aprēķināti statistiskie un dinamiskie raksturojumi. Tiek izanalizēti KMP ietekmes uz apkārtējo vidi rādītāji: summārās nepieciešamās ražošanas enerģijas izmaksas, oglekļa dioksīda un skābes izmeši atmosfērā un ūdens tilpņu eitrofikācija. KMP dinamiskā uzvedība tiek pārbaudīta, risinot pilno GE modeli gan gadījumam ar determinēto ierosmi - KMP stacionāro svārstību analīze pie harmoniskas ierosmes (att. 11a), gan gadījumam ar gadījuma ierosmi- KMP stacionāro gadījuma svārstību analīze.

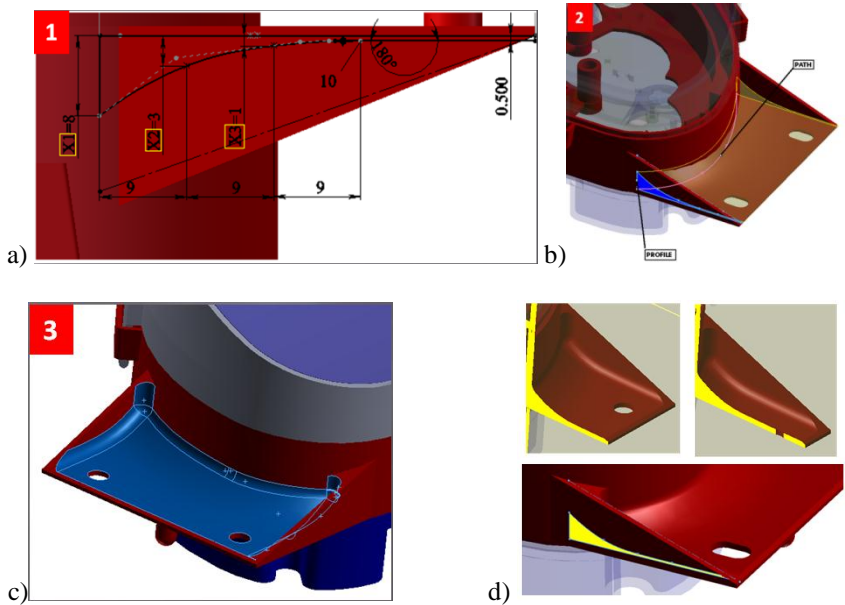


11. att. a) Autobusa KMP harmoniskās ierosmes analīze. Vertikālo pārvietojumu amplitūdu salīdzinājums raksturīgajos KMP punktos un b) Ekvivalento spriegumu piefiksēšanas 5 vietas uz KMP kronšteina

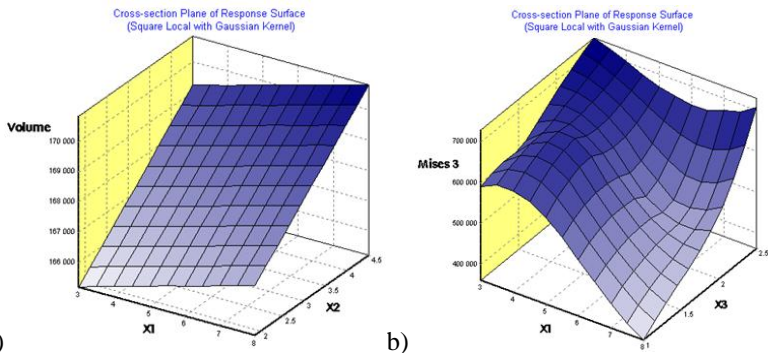
KMP kronšteinu formas parametrizācija tiek veikta ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem (att. 12a-c).

Ar GEM modeļiem aprēķinātās atbildes tiek izmantotas aproksimāciju iegūšanai. Att. 13 ir redzams, ka tilpumam ir pietiekoša lineāra aproksimācija, bet maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  atbildēm ir nepieciešamas augstākas kārtas aproksimācijas. Atrasts, ka lokālā polinomiālā aproksimācija var tikt veiksmīgi izmantota sarežģītu funkciju atbilžu aproksimācijai.

Autobusa KMP kronšteina formas optimizācijas problēma definēta sekojošā veidā: minimizēt KMP korpusa elementa ar kronšteiniem tilpumu  $V$  pie ierobežojumiem 1) uz KMP maksimāliem pārvietojumiem  $URES < 1.5$  mm, 2) uz ekvivalentiem spriegumiem  $\sigma_{vonMises}$  5 kronšteina punktos (att. 11b)  $\sigma_{vonMises} \leq 1.5$  MPa un 3) uz KMP fundamentālo frekvenci  $f > 120$  Hz. Atrasta KMP kronšteinu šķērsriezumu gluda forma ( att. 12d) ar mainīgu šķērsriezuma laukumu, kura ir ar  $\sim 40$  % mazākiem maksimālajiem ekvivalentiem spriegumiem, salīdzinot ar kronšteinu sākotnējo konstrukciju ar konstanto biezumu.



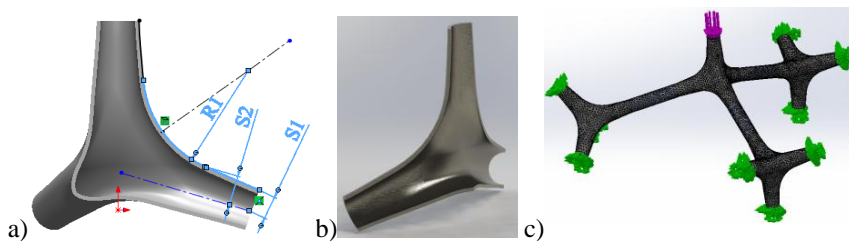
12. att. Kronšteina formas uzdošanas 3 etapi (a-c): a) šķērsriezuma formas definēšana ar NURBS; b) 3D – formas izveidošana caur ceļa līkni; c) papildus noapaļojumi stūros un d) KMP kronšteinu formas optimizācijas rezultāts



13. att. Iegūtās atbilžu atkarības no parametriem X1, X2 un X3 (att. 12a):  
 a) tilpums un b) maksimālais ekvivalentais spriegums  $\sigma_{vonMises}$  punktā 3

**Sestajā nodaļā** veikta tetrapoda elementa formas optimizācija.

Tetrapodu elementu simetrisks režģis [Hyde, 1989], kas izgatavots gan no tērauda, gan no jauniem, viegliem kompozītu materiāliem, varētu būt efektīvi izmantojams jaunu atbalsta konstrukciju veidošanai ar paaugstinātām stinguma īpašībām [Yaghi, 2003; Bervalds, 2009]. Tādas konstruktīvās struktūras ir nepieciešamas nestandarta celtnēm un īpaši gadījumos, kad ir nepieciešams ievērot specifisku dizaina koncepciju [Weaire, 1994; Carfrae, 2007].

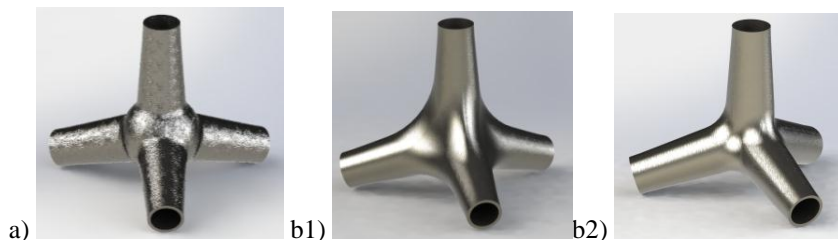


14. att. Tetrapoda elementa parametrizēšana (a-b): a) formas definēšana ar NURBS mezgla punktiem S1; S2 un rādiius R1, b) gluda 1/3 tetrapoda daļa un c) 7 elementu (4 tetrapodi un 3 caurules) čaulas GE modelis ar sākuma varianta formu

3D tetrapoda formu ir iespējams aprakstīt ar 3 parametriem (att. 14a), kas nodrošina nepārtrauktu pludenu formu (att. 14b) pie jebkuras parametru vērtību kombinācijas. Tetrapoda centrālās daļas forma tiek kontrolēta ar rādiius R1. R1 nepārtraukti pa pieskari savienojas ar NURBS līkni, kas tiek uzdots ar 2 parametriem S1 un S2 – NURBS daudzstūra atbalsta punktiem. Šajā gadījumā

lielāks NURBS parametru skaits nav nepieciešams, jo tas tikai apgrūtinātu pludeno formu uzdošanu.

Lielākā šo konstrukciju problēma ir savienojumu stiprība, līdz ar to ir nepieciešams atrast tetrapoda formu, kuram būtu minimāli spriegumi. Lai izpētītu šo problēmu, izvēlēta spiesta konstrukcijas daļa sastāvoša no 7 elementiem, kas parādīta att. 14c.



15. att. Konstrukciju ar vienādu tilpumu  $V$  salīdzinājums: a) sfēriskais, b(1-2)) tetrapods ar sākuma un optimālo formu

Tālāk tiek veikta tetrapoda maksimālo ekvivalento spriegumu  $\sigma_{vonMises}$  minimizācija pie ierobežojumiem uz konstrukcijas tilpumu  $V < 646.933 \text{ mm}^3$ .

Iegūtais rezultāts salīdzināts ar sfērisko savienojumu (att. 15). Rezultātā iegūtās formas tetrapodam ir par 27.3 % lielāka stiprība salīdzinājumā ar sfērisko savienojuma elementu, tai pat laikā tilpums  $V$  ir par 0.2 % mazāks. Iegūtos rezultātus ir iespējams izmantot jaunu nestandarta atbalsta konstrukciju projektēšanai.

## SECINĀJUMI

- Izstrādāta konstrukciju elementu resursus taupoša formas optimizācijas metodika, kurā pēc atbilstošiem kritērijiem optimizēti LH eksperimentu plāni tiek izmantoti, lai iegūtu metamodeļus pētāmo konstrukciju rādītājiem kā funkcijas no nevienmērīgo racionālo B-splainu daudzstūra atbalsta punktu koordinātēm, kas tiek izmantotas formas uzdošanai un optimizācijai ar globālās stohastiskās meklēšanas metodēm.
- Veicot testa piemēru aprēķinus un to validāciju, eksperimentāli pierādīts ka ar izstrādāto metodiku, patērējot ievērojami mazākus resursus, ir iespējams iegūt labākus optimizācijas rezultātus kā ar klasisko homogenizācijas metodi.

- Dažāda veida sistēmām veiktā formas optimizācija parādīja, ka piedāvātais likņu formas parametrizācijas paņēmiens ar NURBS daudzstūra atbalsta punktiem dod vislabākos rezultātus.
- Atrisināta vagona mērīšanas sistēmas elementu konstruktīvās formas optimizācijas problēma, izveidojot noņemamo eliptiskas formas disku ar mainīgu biezumu, kuram salīdzinot ar sākotnējo konstrukciju ir par ~64% samazināts svars, ir nepieciešamā stiprība, pieļaujamie pārvietojumi un pašfrekvences.
- Veikta celtniecības bloka dobuma formas optimizācija, ievērojot trausla materiāla stiprības un materiālu siltumizolējošās īpašības, kā rezultātā atrasts alternatīvais bloks, kas, salīdzinot ar eksistējošo, nodrošina ~8 % betona masas ekonomiju.
- Realizēta formas optimizācija autobusa kontroles mēraparātu paneļa (KMP) kronšteinam, samazinot maksimālo ekvivalento spriegumu līmeni tajā par ~40 %, salīdzinot ar sākotnējo konstrukciju, kā arī nodrošinot virkni dinamiskos u.c. rādītājus.
- Veikta cauruļu savienojošā elementa - tetrapoda 3D formas optimizācija konkrētai konstrukcijai, atrasta tā optimālā forma pie definētā kritērija un ierobežojumiem, kas nodrošina par 27.3 % lielāku stiprību salīdzinājumā ar sfērisko savienojuma elementu.
- Labākie rezultāti vairums gadījumos iegūti, lietojot LH eksperimentu plānus, kuri optimizēti pēc vidējās kvadrātiskās distances kritērija, un veidojot lokālās polinomiālās aproksimācijas ar Gausa kodolu.
- Atbilstoši CAD/CAE programmatūrai izveidoti makrosi, kas automatizē eksperimentu plānu ievadīšanu un atbilžu nolasīšanu, un būtiski samazina optimizācijas datu sagatavošanas laiku.
- Praktisko problēmu risinājumi apliecina izstrādātās formas optimizācijas metodikas efektivitāti, tā var tikt izmantota plaša spektra izstrādājumu projektēšanai ar CAD/CAE līdzekļiem.

## ZINĀTNISKO PUBLIKĀCIJU UN PATENTU SARAKSTS

- Promocijas darba rezultāti atspoguļoti 28 publikācijās, tai skaitā, vienā zinātniskā monogrāfijā (grāmatas nodaļa), 21 rakstā, vienā patentā un 5 tēzēs.
1. Januševskis A., Auziņš J., Kovaļska A., Meļņikovs A., Ozoliņš O. Vibrotriecienpreses ģeometriskā un aprēķinu modeļu izstrāde // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēr., Mašīnzinātne un transports, 28. sēj., 2008. - 63.-77. lpp.
  2. Boiko A., Balckars P., Auziņš J., Meļņikovs A. Remonta stiprinājumu efektivitātes vērtējums cisternvagona fasonķepu zonā // RTU zinātniskie

- raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēj., Mašīnzinātne un transports. - 32. sēj., 2009. - 12.-17. lpp.
3. Auziņš J., Boiko A., Janušovskis A., Janušovskis J., Kovaļska A., Meļņikovs A., Pfafrods J. Development of Methods and Tools for Simulation, Identification and Multiobjective Optimization of Mechanical Systems at the Machine and Mechanism Dynamics Laboratory // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēj., Mašīnzinātne un transports. - 31. sēj., 2009 - 19.-26. lpp.
  4. Janušovskis A., Meļņikovs A., Boiko A. Shape Optimization of Mounting Disk of Railway Vehicle Measurement System // Journal of Vibroengineering. – Volume 12, Issue 4, ISSN 1392-8716, Editors K. Ragulsikis, V. Babitsky, N. Bachschmid, 2010. - pp. 436.-442.
  5. Boiko A., Janušovskis A., Meļņikovs A., Vuchetich I. Vagona mērīšanas sistēmas konstruktīvās formas optimizācija // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēj., Mašīnzinātne un transports. - 33. sēj., 2010. - 78.-82. lpp.
  6. Janušovskis A., Meļņikovs A. Bloka formas optimizācija // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēj., Mašīnzinātne un transports. - 33. sēj., 2010. - 89.-97. lpp.
  7. Янушевскис А.В., Мельников А.Г., Пакалнс Р. Д.. Методика оптимизации формы элементов механических систем проектируемых средствами CAD/CAE: тесты // V Международная научно-техническая конференция "Современные проблемы машиностроения", Россия, Томск, 23.-26. ноябрь, 2010. - стр. 519 – 524.
  8. Янушевскис А.В., Мельников А.Г., Бойко А. Ф. Методика оптимизации формы элементов механических систем проектируемых средствами cad/cae: промышленные примеры // Современные проблемы машиностроения. Труды V Международной научно-технической конференции, Редакторы И-Кан А., Крауиньш П. Я., Петрушин С.И., Овечкин Б.Б., Советченко Б.Ф., Россия, Томск, 23.-26. ноябрь, 2010. - стр. 524.-530.
  9. Janushevskis A., Melnikovs A., Auzins J., Gerina-Ancane A., Klimass H. Simulation of Behavior of Vehicle Gage Panel // 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Volume 10, ISSN 1691-3043, Editors L. Malinovska, V. Osadcuks, Latvia, Jelgava, 26.-27. May, 2011. – pp. 162.-167.
  10. А.В. Янушевскис, А.Г. Мельников, И.Д. Кактабулис. Методика оптимизации формы элементов механических систем // Рецензируемый научный журнал РФ «Известия Томского политехнического университета», ISSN 1684-8519,N2, Томск, 2011. - 21-25 стр.

11. A. Janushevskis, J. Auzins, A. Gerina-Ancane, A. Melnikovs, J. Viba. Multiobjective Optimization of Automotive Vehicle Gage Panel. // Vibration Problems ICOVP 2011. The 10th International Conference on Vibration Problems. ISBN 978-80-7372-759-8 , Editors S. Segla, J. Tuma, I. Petrikova, L. Pesek, J. Zapomel, A. Kruisova, O. Gendelman, A. Berezovski. Czech Republic, Prague, 5-8. September, 2011.– pp. 180 -185.
12. A. Janushevskis, A. Melnikovs, J. Auzins, A. Boyko, A.Gerina-Ancane. Designing of Automotive Vehicle Gage Panel. // 9th International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology - AMST'11. CIP 120909033, ISBN – 978-953-6326-64-8, Editor Elso Kuljanic, Mali Lošinj, Croatia, 16-17. June, 2011. – pp. 507-518.
13. Januševiskis A., Januševiskis J., Meļņikovs A., Geriņa-Ancāne A. Plānsienu konstrukciju formas optimizācijas metodika. Tēžu krājums „Arvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress”. Sekcija ”Tehniskās zinātnes”. Rīga, 2011. gada 24. – 27. oktobris, 187. lpp.
14. А. В. Янушевский, А.Г.Мельников, А.Э.Гериня-Анцане. Проектирование корпуса автомобильного приборного щитка // VI Международная научно-техническая конференция "Современные проблемы машиностроения", Редакторы И-Кан А., Крауиньш П. Я., Петрушин С.И., Овечкин Б.Б., Гнусов С.Ф., Россия, Томск, 28.сентября -2. октября, 2011. – стр. 316 - 323.
15. Janushevskis A., Auzins J., Melnikovs A., Gerina-Ancane A. Shape optimization of mechanical components of measurement systems. Chapter 12 in Open Access Book “Advanced Topics in Measurements”. Ed. Z. Naq. ISBN 978-953-51-0128-4, InTech – Open Access Publisher, 2012. - pp. 243-262.
16. Janushevskis A., Auzins J., Melnikovs A., Staltmanis A., Vaicis I., Viba J. Wood Pole Overhead Lines Strength Problems under Extreme Weather Loads // 11th International Scientific Conference „Engineering for Rural Development”, Volume 11, ISSN 1691-3043, Editors Larisa Malinovska, Vitalijs Osadcuks, Jelgava, Latvia, 24.-25. May, 2012. - pp. 267 -272.
17. Janushevskis A., Melnikovs A., Simanis O., Janusevskis J. Shape Optimization Technique of Objects Designed Using CAD/CAE. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference. ISBN 978-9934-10-360-5, Riga, Latvia, 11-12 October 2012, p. 586.
18. Janushevskis A., Melnikovs A., Gerina-Ancane A, Janusevskis J. Dynamic Analysis of Automotive Gage Panel. Experimental Mechanics. New Trends and Perspectives. Ed. J.F. Silva Gomes and Mario A.P. Vaz. Porto, Portugal, 22-27 July 2012, ISBN: 978-972-8826-25-3, REF: 2812 – pp. 739-740.

19. Janushevskis A., Melnikovs A., Gerina-Ancane A, Janusevskis J. Dynamic Analysis of Automotive Gage Panel. Proceedings of the 15th International Conference on Experimental Mechanics – ICEM15. Ed. J.F. Silva Gomes and Mario A.P. Vaz. Porto, Portugal, 22-27 July 2012, ISBN: 978-972-8826-26-0, REF: 2812, CD disk –13 p.
20. Janushevskis A., Melnikovs A., Boyko A. Shape Optimization of 3D Mechanical Systems using Metamodels. Advanced Materials Research. MEMS and Mechanics. Vol. 705, 2013, pp. 429-435.
21. Janushevskis A., Melnikovs A., Janusevskis J. Shape Optimization of a Lightweight Tetrapod Element Using CAD/CAE Tools and Metamodels. IRF 2013 – 4th International Conference on Integrity, Reliability & Failure. Funchal, Portugal, 23-27 June 2013, REF: 3948, – pp. 513-514.
22. Janushevskis A., Melnikovs A., Janusevskis J. Shape Optimization of a Lightweight Tetrapod Element Using CAD/CAE Tools and Metamodels. Proceedings of the IRF 2013 – 4th International Conference on Integrity, Reliability & Failure. Funchal, Portugal, 23-27 June 2013, REF: 3948, CD disk – 11 p.
23. Auzins J., Kalnins K., Labans E., Prieditis R., Melnikovs A. Metamodel building on the basis of globally weighted high order polynomials. WCSMO-10: 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Abstracts Book.,Orlando, FL, May 19-24, 2013. REF. 5592–2 p.
24. Auzins J., Kalnins K., Labans E., Prieditis R., Melnikovs A. Metamodel building on the basis of globally weighted high order polynomials. Proceedings of the WCSMO-10: 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization.,Orlando, FL, May 19-24, 2013, CD disk REF. 5592– 7 p.
25. Januševiskis A., Januševiskis J., Meļņikovs A., Geriņa-Ancāne A. Plānsienu konstrukciju formas optimizācijas metodika. (Shape optimization technique of thin-wall constructions) // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēr., Mašīnzinātne un transports. - 33. sēj., 5 lpp, Pieņemts.
26. Januševiskis A., Meļņikovs A., Vaicis I. Vidsprieguma gaisvadu elektropārvades līniju mehāniskās stiprības analīze // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēr., Mašīnzinātne un transports. - 33. sēj., - 7 lpp, Pieņemts.
27. Januševiskis A., Meļņikovs A., Boiko A. Dzelzceļa vagonu cisternu balsta fasonķepu formas optimizācija // RTU zinātniskie raksti. ISSN 1407- 8015, 6. sēr., Mašīnzinātne un transports. - 33. sēj., - 6 lpp, Pieņemts.  
Iegūts LR patents:
28. Patents Nr. 14386, Latvijas Republika. Žiroskopiskais paņēmiens peldlīdzekļa dzinējspēka radīšanai / J. Vība, J. Auziņš, V. Beresņevičs, S.

Cifanskis, I. Kaktabulis, G. Kuļikovskis, I. Tipāns, A. Meļņikovs, M. Kruusmaa, W. Megill. 2012.

## PROJEKTU SARAKSTS

Šis darbs ir atbalstīts un veikts sekojošos projektu ietvaros:

1. Rīgas Tehniskā universitāte īsteno Eiropas Sociālā fonda (ESF) līdzfinansētu darbības programmas papildinājuma 1.1.2.1.2. apakšaktivitātes projektu «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai», vienošanās Nr. 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005.
2. ES 7 IP projekts «Robotizētas zivs peldēšanas un vadības izpēte» - FILOSE.
3. Vilciena riteņpāra sloģojuma mēraparatūras konstrukcijas stiprības aprēķinu veikšana saskaņā ar eksperimentu plāniem - darbs projektā FLPP-2009/45 „Metamodelēšana ar CAD/CAE līdzekļiem projektētu mehānisko sistēmu formas optimizēšanai”.
4. LZP projekts Nr. 09.1267 „Inovatīvu diskrētu un nepārtrauktu sistēmu, tehnoloģiju, kompozītu materiālu un mehatronisku sistēmu radīšana, pielietojot dinamiskās analīzes, optimizācijas un strukturālās sintēzes metodes”.
5. RTU un Latvenergo projekts Nr. 11-11-27 "20 kV gaisvadu EPL mehāniskās noturības robežu analīze un ekspertīze pie ekstremāliem klimatiskiem apstākļiem”.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- Arora J. S. Introduction to Optimum Design. 2ndEd., Elsevier. 2004. -700 p.
- Bendsoe M. P. and Sigmund O. Topology Optimization. Chaper 6 in „Optimization of Structural and Mechanical Systems”. Ed. Arora J. S. World Scientific, 2007. – pp. 161–194.
- Bervalds E., Dobelis M. and Verners O. Geometric Parameterization of A Tetrapod-Shaped Structural Element // Proceedings of the 10th International Conference on Geometry and Graphics, Vilnius, Lithuania: June 4-5, 2009. – pp. 24.-29.
- Carfrae Tr. Box of Bubbles. Ingenia Online, Issue 33, Dec. 2007.
- Deb K. Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples, 2<sup>nd</sup> Ed., 2013. – 440 p.
- Christensen P.W. and Klarbring A. Introduction to Structural Optimization. Springer, 2009.-214 p.

Genesis User's Manual, Version 7.5. Vanderplaats Research & Development, Inc. Colorado Springs, CO, 2007.

Hyde B.G. and Andersson S. Inorganic crystal structures. – New York: Wiley, 1989. – pp. 10 - 56.

Janushevskis A., Auzins J., Janushevskis J., Viba J. Optimization of Subsonic Aerodynamic Shape by Using Metamodeling Approach. Proceedings 5th International DAAAM Baltic Conference “Industrial Engineering – Adding Innovation Capacity of Labour Force and Entrepreneurs”, 20-22nd April 2006, Tallinn, Estonia, 2006. - pp. 41-46.

Jung J.J. and Lee. T.H. Metamodel-based Shape Optimization of Connecting Rod Considering Fatigue Life. Key Engineering Materials, VOL 306/308; Part 1, 2006. - pp. 211-216.

Koziel Sl., Ciaurri D. E. and Leifsson L. Surrogate-Based Methods. Chapter 3 in “Computational Optimization, Methods and Algorithms”. Ed. S. Koziel, Springer, 2011. – 300 p.

Lee H.T. and Jung J.J. Kriging metamodel based optimization. Chapter 16 in „Optimization of Structural and Mechanical Systems”. Ed. Arora J. S. World Scientific, 2007. – pp. 445-484.

Lee T. H. and Jung J. J. Maximin Eigenvalue Sampling of Kriging mode. 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, New York, 2004. - Ref. AIAA 2004-4488.

Liang Q.Q., Xie Y.M. and Steven G.P. A Performance Index for Topology and Shape Optimization of Plate Bending Problems with Displacement Constraints. Structural and Multidisciplinary Optimization, Berlin, 2001. – pp. 393-399.

Liao X.T., Li Q., Yang X.J., Zhang W.G. and Li W. Multiobjective optimization for crash safety design of vehicles using stepwise regression model. Structural and Multidisciplinary Optimization. V35, 2007. - pp. 561-569.

Miltiadis A.B. CAD/CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation. Ventus Publishing ApS, 2010.- 174 p.

Montgomery D. C. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, 5th Ed., 2001. – 684 p.

Mozumder C. K. Topometry optimization of sheet metal structures for crashworthiness design using hybrid cellular automata. ProQuest, 2011. – 126 p.

Nocedal J. and Wright S. Numerical Optimization. Springer, 2<sup>nd</sup> Ed., 2006. - 686 p.

Papadrakakis M., Lagaros N., Thierauf G. and Cai J. Advanced solution methods in structural optimisation using evolution strategies. Engineering Computational Journal, 15 (1), 1998. – pp.12-34.

Rao R.V. and Savsani V. J. Mechanical Design Optimization Using Advanced Optimization Techniques. Springer, 2012. – 332 p.

Saxena An. and Sahay B. Computer Aided Engineering Design. 2005. – 393 p.

Simpson T. W., Booker A. J., Ghosh D., Giunta A. A., Koch N. P. and Yang R. Approximation Methods in Multidisciplinary Analysis and Optimization: A Panel Discussion. Structural and Multidisciplinary Optimization, vol. 27, 2004. pp. 320- 313.

Vanderplaats G. N. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications. 4th Ed., Vanderplaats Research and Development, Inc. 2004. -377 p.

Weaire D. and Phelan R. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces, Phil. Mag. Lett. 69, 1994, pp. 107–110.

Yaghi O.M., O'Keeffe M., Ockwing N.W., Chae H.K., Eddaouidi M. and Kim J. Reticular synthesis and the design of new materials. Nature (423), 12, 2003. - pp. 705-713.

Zienkiewicz O.Z. and Taylor.R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Butterworth-Heinemann, 6 Ed., 2005. – 752 p.

Григоров И. Н. Практические конструкции антенн. ДМК, 2005. – 350 с.