

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Agrita KOVAĻSKA

**METAMODELĒŠANAS PIELIETOJUMS
DINAMISKU SISTĒMU ANALĪZĒ UN
OPTIMIZĀCIJĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Mehānikas institūts

Agrita KOVAĻSKA
Doktora studiju programmas „Mašīnbūve” doktorante

**METAMODELĒŠANAS PIELIETOJUMS
DINAMISKU SISTĒMU ANALĪZĒ UN
OPTIMIZĀCIJĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors, LZA korespondētājloceklis
J.AUZIŅŠ

Rīga 2012

UDK 519.242 (043.2)
Ko 946 m

Kovaļska A. Metamodelēšanas
pielietojums dinamisku sistēmu analīzē
un optimizācijā. Promocijas darba
kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-23 lpp.

Iespiests saskaņā ar Mehānikas institūta
2011.gada 4.oktobra lēmumu, protokols
Nr.4



Darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda (ESF)
līdzfinansētu projektu «Atbalsts RTU doktora studiju
īstenošanai – 2»

ISBN

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

Promocijas darbs inženierzinātņu (inženiertehniskas, mehānikas un mašīnbūves) doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012.g. 26. oktobrī Rīgas Tehniskās universitātes Mehānikas fakultātē, Ezermalas ielā 6, 302. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

1. Profesors, Dr. habil. sc. ing. Jānis Vība, Rīgas Tehniskā universitāte
2. Profesors, Dr. sc. ing. Oskars Onževs, Augstskola „Turība”
3. Profesors, Dr. sc. ing. Aleksandrs Korjamins, Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Agrita Kovaļska(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 64 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 122 lappuses. Literatūras sarakstā ir 85 nosaukumi.

SATURA RĀDĪTĀJS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis.....	6
Pētījuma uzdevumi.....	6
Darba zinātniskā novitāte.....	7
Darba praktiskā vērtība.....	7
Aizstāvēšanai tiek izvirzīts	7
Publikācijas.....	8
Aprobācija.....	10
DARBA SATURS	12
Pirmā nodaļa	12
Otrā nodaļa.....	13
Trešā nodaļa	15
Ceturtā nodaļa	16
Piektā nodaļa.....	18
SECINĀJUMI.....	20
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	21

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Metamodelēšana ir jauns zinātniskais virziens teorētiskajā un eksperimentālajā mašīnzinātnē un mehānikā. Šī metode ļauj iegūt informāciju par pētāmā objekta struktūru, analizējot tikai šī objekta (mašīnas, mehānisma, tehnoloģiskā procesa) reģistrētos izejas mērījumus un identificējot gan objekta matemātisko modeli, gan tā ieejas parametru vērtības, pielietojot gan naturālos eksperimentus, gan datoreksperimentus ar dažādām matemātiskās modelēšanas programmām (ANSYS, ADAMS, LSDYNA u.c.). Sevišķi svarīgi ir izstrādāt un pārbaudīt metamodelēšanas metodiku dinamiskiem procesiem, kur eksperimentu atbildes ir nevis skaitļi, bet laika funkcijas.

Darba tematika ir saistīta ar agrāk izpildītajiem RTU Mehānikas institūta Mašīnu un mehānismu dinamikas problēmu zinātniskās laboratorijas darbinieku veiktajiem pētījumiem Izglītības un zinātnes ministrijas, Latvijas zinātnes padomes un starptautiskajiem ES 6 un 7 ietvarprogrammas zinātniskajiem projektiem (Aurora, COCOMAT, INTERSHIP, FRIENDCOPTER u.c.) zinātniekiem.

Darba ietvaros ir attīstīta RTU izstrādāto eksperimentālās mehānikas un modelēšanas metodoloģija, pielietojot to būvmateriālu ražošanas – betona formēšanas vibropresēšanas tehnoloģijas analīzē un dažādu tās elementu optimizācijā.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir dinamisku sistēmu eksperimentālas optimizācijas metodikas izstrāde, piemērojot to betona vibropresēšanas tehnoloģijai.

Pētījuma uzdevumi

1. Dinamisku sistēmu eksperimentālas optimizācijas metodikas izstrāde.
 - 1.1. Dinamisku procesu atbildes funkcijas aproksimācija.
 - 1.2. Optimālo eksperimentu plānu izveide.
 - 1.3. Metamodeļu izveide atbildes funkcijas atkarībai no ieejas faktoriem.
 - 1.4. Multikriteriālā optimizācija.
2. Izstrādātās metodikas piemērošana betona vibropresēšanas tehnoloģijai.
 - 2.1. Vibropresēšanas procesa kompaktēšanas procesa vienkāršota metamodeļa izveide (līknes apraksts ar 3 parametriem).
 - 2.2. Eksperimentālās iekārtas izveide, eksperimentu izpilde.
 - 2.3. Pilna vibropresēšanas procesa metamodeļa izveide.
 - 2.4. Multikriteriālas optimizācijas mērķfunkciju un ierobežojumu formulējums, optimizācijas veikšana.
 - 2.5. Rezultātu verifikācija un validācija.

Darba zinātniskā novitāte

Darba ietvaros ir paredzēts attīstīt RTU izstrādāto eksperimentālās mehānikas un modelēšanas metodoloģiju, pielietojot to būvmateriālu ražošanas – betona formēšanas vibropresēšanas procesa analīzē.

Darba praktiskā vērtība

Turpmākais izstrādātās metodikas pielietojums dažādu mehānisku sistēmu, t.sk. transportlīdzekļu elementu dinamiskajā optimizācijā. Dinamisku procesu (pārejas procesu vai stacionāro režīmu) ir iespējams relatīvi vienkārši analizēt un optimizēt, izmantojot metamodelēšanas pieeju, balstoties uz šajā darbā izstrādāta algoritma soļiem (5. att.). Piemēram, līdzīgi var pakļaut apstrādei tādu dinamisku procesu kā automašīnas bremsēšanas procesu (par ievaddatiem izvēloties automašīnas masu, sākotnējo ātrumu un berzes koeficientu, par izeju – bremsēšanas trajektoriju), izšautās lodes aerodinamiku (par ievaddatiem izvēloties lodes masu, izmērus, izšaušanas ātrumu, par izeju – lidošanas trajektoriju), u.c. Šāda veida metodika ļauj ietaupīt projektēšanas laiku un palīdz saskatīt dinamiskā procesa būtību.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts

- Izstrādāta metamodelēšanas metodika dinamisko sistēmu analīzei, kura satur:

- 1) dinamiskā pārejas procesa vienkāršota modeļa izveidi ar galīga skaita parametriem,
 - 2) dinamiskā procesa ieejas faktoru izvēli,
 - 3) naturālo un skaitlisko eksperimentu plāna izveidi un izpildi,
 - 4) procesa metamodeļa izveidi, pielietojot parametriskās un neparametriskās aproksimācijas metodes,
 - 5) procesa daudzkriteriālās optimizācijas veikšanu,
 - 6) rezultātu verifikāciju un validāciju.
- Izstrādātās metodikas pielietojums betona vibropresēšanas procesa analīzei un optimizācijai.
 - Izstrādātie dinamiskā (vibropresēšanas) procesa formēšanas sakarību metamodeļi.
 - Izstrādātie metamodeļi, kas raksturo kompaktēšanas procesa parametru atkarību no tehnoloģiskā procesa parametriem.
 - Izmantojot metamodelēšanas pieeju, veikta vibropresēšanas procesa daudzkriteriālā optimizācija.
 - Izstrādātais metamodelēšanas pielietojuma algoritms dinamisku sistēmu analīzē un optimizācijā

Publikācijas

1. Auzins J., Janushevskis A., Kovalska A., Ozoliņš O. „Experimental Identification and Optimization of the Concrete Block Vibropressing Process”. *Journal of Vibroengineering*, Vol.12, Issue 3. (2010) 1.-12. lpp.

2. Auziņš J., Janušovskis A., Kovaļska A., Meļņikovs A., Ozoliņš O. „Vibrotrīcienpreses ģeometriskā un aprēķinu modeļu izstrāde”. *RTU Zinātniskie raksti, Mašīnzinātne un transports*. – ISSN 1407-8015, 6.sērija, 28. sējums, 2008., 63. – 77. lpp.
3. Auziņš J., Janušovskis J., Kalniņš K., Kovaļska A. „Optimization and Metamodeling of Metal Sandwich Panel Structures”; *RTU Zinātniskie raksti, Mašīnzinātne un transports*. – ISSN 1407-8015, 6.sērija, 33. sējums, 2010., 83. – 88. lpp.
4. 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, Mašīnzinātne un transports*. – ISSN 1407-8015, 6.sērija, 31. sējums, 2009., 19. – 26. lpp.
5. Kovaļska A. „Beramu materiālu vibropresēšanas procesa strukturālā identifikācija un optimizācija” *RTU Zinātniskie raksti, Mašīnzinātne un transports*, Rīga 2011. Apstiprināts publicēšanai.
6. Auziņš J., Kovaļska A. „The effect of vibropressing process on the strength of concrete” *16th International Conference Mechanika – 2011*, Lietuva, Kauņa, 7.-8. aprīlis, 2011, *Mechanika: Proceedings of 16th International Conference*, 19.-23. lpp.

7. Auzins J., Kovalska A. „The investigation of vibropressing process technology” *10th International Scientific Conference “Engineering for Rural development”*, Latvija, Jelgava, 26.-27. maijs, 2011, 10th International Scientific Conference “Engineering for rural development. Proceedings, Volume 10.,. 408.-412. lpp.
8. Auzins J., Kovalska A. „Computational dynamic analysis of raw concrete vibropressing process” *Vibration Problems ICOVP 2011, Supplement, The 10th biennial International Conference on Vibration Problems*, 5.-9. sept. 2011., 192.-198. lpp.
9. Auzins J., Janushevskis A., Kovalska A, Ozolins O. „Experimental identification and optimization of concrete block vibropressing process” *Proceedings of WCSMO-8 Eight World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1-5 June 2009, Lisboa, Portugal, CD-ROM edition, 10 pages

Aprobācija

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti starptautiskās konferencēs un regulāri prezentēti LNMK zinātniskos semināros:

1. J. Auzins, A. Janushevskis, A. Kovalska, O. Ozolins *Experimental identification and optimization of concrete block vibropressing process. WCSMO-8 Eight World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, 1-5 June 2009, Lisboa, Portugal

2. J. Auziņš, A. Januševskis, A. Kovaļska, O. Ozoliņš „Experimental Identification and Optimization of the Concrete Block Vibropressing Process”
VIBROENGINEERING 2009, 8th INTERNATIONAL CONFERENCE, September 16-18,2009, H. Manto str.84, LT-92294, Klaipeda University Klaipeda, Lithuania
3. J. Auziņš, J. Januševskis, A. Kovaļska „Vienas mehāniskās sistēmas parametru optimizācija”, Sekcija «Ražošanas tehnoloģija un transports» Apakšsekcija " Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve", *RTU 50. Starptautiskā zinātniskā konference*, 16.oktobris, 2009., Ezermalas-6, Rīga, Latvija
4. J. Auziņš, A. Januševskis, A. Kovaļska “Experiemental identification and multiobjective optimization of vibrocompacting process of composite substances, *Mechanics of composite materials*, 24 - 28. maijs, 2010. g., Jūrmala, Latvija
5. A. Kovaļska RTU, „Beramu materiālu vibropresēšanas procesa strukturālā identifikācija un optimizācija” *RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference*, 11.-15. oktobris, 2010.g., Rīga, Latvija
6. J. Auzins, A. Kovalska “The effect of vibropressing process on the strength of concrete” *16th International Conference Mechanika 2011*, 7 - 8 April, 2011 Kaunas, Lithuania

7. A. Kovalska, J. Auzins “The investigation of vibropressing process technology” *10th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, 26 - 27 May, 2011, Jelgava, Latvia

8. A. Kovalska, J. Auzins „Computational dynamic analysis of raw concrete vibropressing process” *Vibration problems – ICOVP 2011, International Conference On Vibration Problems 2011*, Technical University of Liberec, 5 – 9 September, 2011, Liberec, Czeck Republic

9. A. Kovaļska, disertācijas aprobācija pirms tās aizstāvēšanas ar nosaukumu: „METAMODELĒŠANAS PIELIETOJUMS DINAMISKU SISTĒMU ANALĪZĒ UN OPTIMIZĀCIJĀ”, *RTU Mehānikas institūta Mehānikas seminārs*, 4. oktobris, 2011.g., RTU, MEHĀNIKAS INSTITŪTS, Latvija, Rīga, Ezermalas iela 6.

10. A. Kovaļska „Beramu materiālu vibropresēšanas procesa strukturālā identifikācija un optimizācijas kritēriji” *Apvienotais Pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress „Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte”* Rīgā, 24.-27. oktobris, 2011. g., Apakšsekcija „Mehānika un mašīnbūve”, Stenda referāts, Rīgas Tehniskā universitāte.

DARBA SATURS

Pirmajā nodaļā ir apkopota informācija par metamodelēšanas metodiku [1, 8, 10, 11, 17], kurā ietilpst

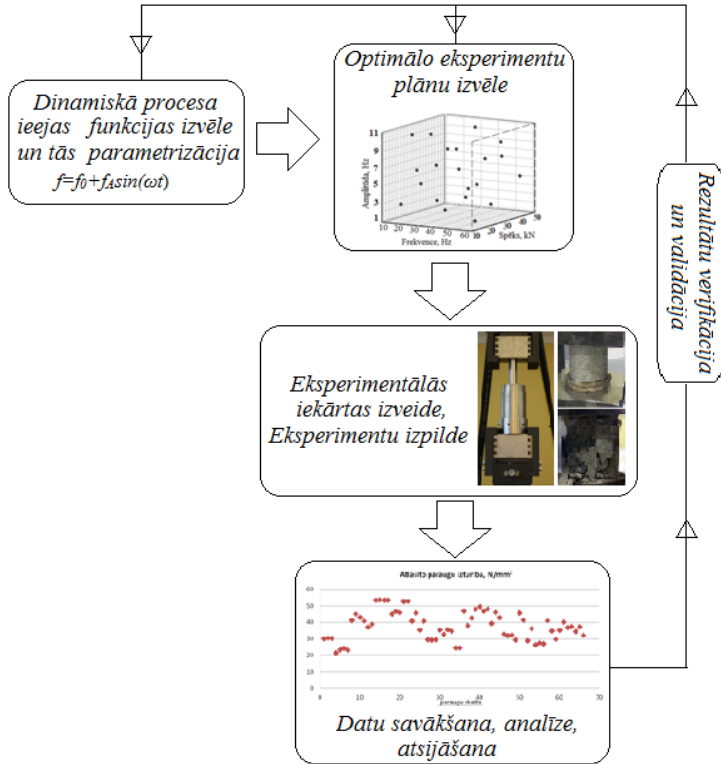
eksperimentu plānošana un analīze [2, 3, 5, 6, 12, 16], ir aplūkotas vairākās aproksimācijas tehnikas [2, 3, 7, 9, 16, 17]. Ir aplūkota optimizācijas metodika, optimizācijas uzdevumu nostādne [2, 4, 13, 14, 15, 18], ka arī daudzkriteriālās optimizācijas atrisinājumu iespējas [13, 14, 15]. Par dinamisko sistēmu, kuras analīzei tiks pielietota metamodelēšanas metodika, ir ņemts betona paraugu formēšanas vibropresēšanas process. Aplūkotās dinamiskās sistēmas eksogēnie parametri ir vadāmi, bet endogēnie parametri satur gadījuma izkliedes.

Lai iepazītos ar dinamiskās sistēmas pētāmā materiāla raksturu, ir neliels ieskats par betona struktūru un īpašībām [19, 20].

Otrajā nodaļā tiek izveidots vibropresēšanas procesa metamodelis, ir izveidots eksperimentu plāns. Lai realizētu eksperimentu plānu, bija nepieciešams uzprojektēt un izveidot eksperimentālo aprīkojumu ar programmatūras SolidWorks palīdzību, kas arī ir iekļauts šajā nodaļā. Tiek noteikts betona javas sastāvs visiem turpmākajiem eksperimentiem. Eksperimentu veikšanas laikā visi eksperimentu mērījumu dati tika savākti un apkopoti tabulās. Vispirms betona paraugi tika formēti, mainot vibropresēšanas procesa parametrus pēc izstrādāta eksperimentu plāna, katru mēģinājumu atkārtojot vismaz trīs reizes, tad pēc 28 dienām šie paraugi tika sagrauti. Tad visi eksperimenta laikā iegūtie dati tika apstrādāti ar mērķi izslēgt tos rezultātus, kas satur rupju kļūdu. To mērījumu vērtības, kas satur rupju kļūdu, stipri atšķiras no visiem pārējiem mērījumiem.

Atlasīto paraugu izturības vērtības pēc rezultātu apstrādes ļauj precīzāk noteikt paraugus, kuri tika formēti pie vienādiem vibropresēšanas procesa parametriem.

Tieši šīs vērtības kalpo par pamatu turpmākai šajā darbā metodikas izstrādei betona bloku vibropresēšanas procesa metamodelēšanai un optimizācijai.



1. att. Nodaļas izstrādātas metodoloģijas posma algoritms

Šajā nodaļā ir izstrādāts metamodelēšanas pielietojuma metodikas izstrādes dinamisko sistēmu analīzei pirmais posms. Nodaļas izstrādātas metodoloģijas posma algoritmu var apskatīt 1. attēlā.

2. nodaļā ir izvēlēti eksperimenta ieejas un izejas faktori, ir izveidota eksperimentālā iekārta, veikta eksperimentu atsijāšana.

Izstrādātās metodikas algoritma pirmais posms paredz rezultātu verifikāciju un validāciju nepieciešamības gadījumā, augstākas precizitātes iegūšanai. Iespējams, ka ir nepieciešami uzlabojumi aproksimācijas modeļa izveidē, eksperimentu plāna izmaiņas un papildināšana.

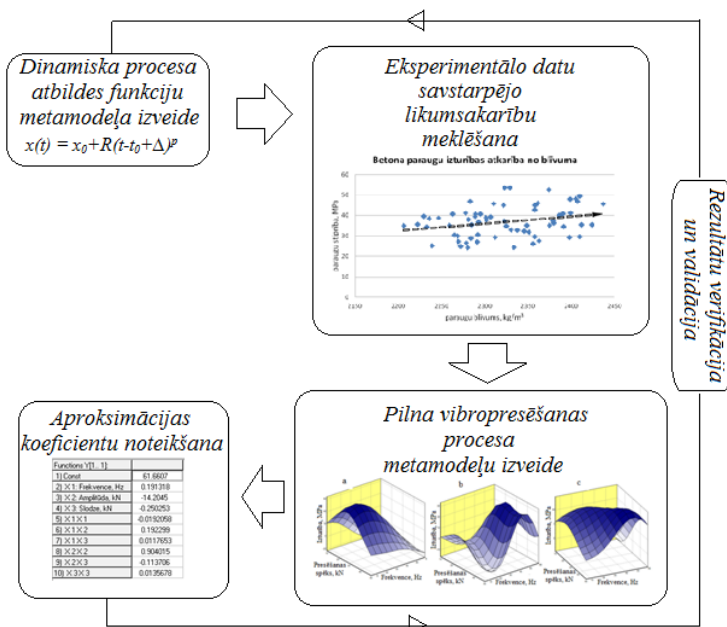
Trešajā nodaļā, balstoties uz iegūtajiem eksperimentu datiem, tika izveidots dinamiskā procesa atbildes funkciju metamodelis.

Tad tiek aplūkota katra vibropresēšanas procesa mainīgā parametra ietekme uz iegūto paraugu izturību, lai veidotos priekšstats par paša procesa raksturu, lai noskaidrotu, vai pastāv acīmredzamas sakarības starp ievadītajiem un iegūtajiem datiem.

Ar programmatūras EDAOpt [2] palīdzību ir izveidoti metamodeļi paraugu izturības atkarībai no kompaktēšanas procesa parametriem pēc polinomiālās regresijas kvadrātiskās un Kringinga aproksimācijas metodēm, rezultāti tika salīdzināti savā starpā ņemot vērā krosvalidācijas kļūdas vērtību Kringinga aproksimācijai – 7.3% un polinomiālās regresijas krosvalidācijas kļūdu - 25.6%. Ar Mathcad programmatūras palīdzību ir pārbaudīta polinomiālās regresijas kvadrātiskās aproksimācijas metamodeļa pielāgošanas kvalitāte [16] iegūtajiem datiem pēc Fišera kritērija.

Ir noteikti aproksimācijas koeficienti, kas nepieciešami turpmākās daudzkriteriālās optimizācijas veikšanai.

Nodaļas izstrādātās metodoloģijas posma algoritmu var apskatīt 2. attēlā.

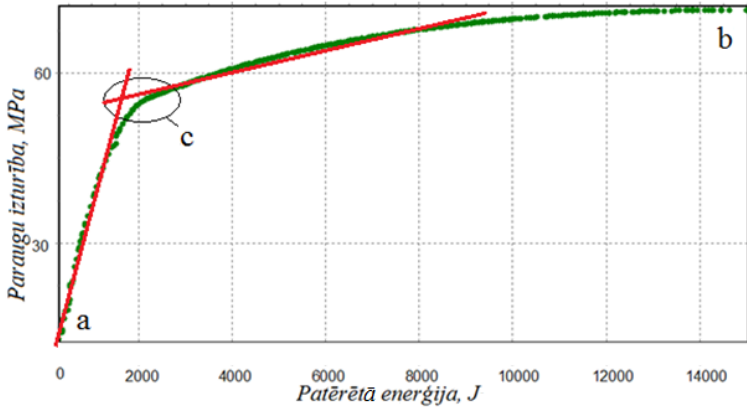


2. att. Nodaļas izstrādātās metodoloģijas posma algoritms

Ceturtajā nodaļā, balstoties uz izvēlēta dinamiskā procesa raksturparametriem, ņemot vērā vibropresēšanas procesa īpašības, betona sastāvu, tika noteikti multikriteriālās optimizācijas mērķfunkcijas un ierobežojumi. Lai optimizētu vibropresēšanas procesu, tiek izvirzīti sekojošie kritēriji:

1. Procesu ilgums, $(t, s) \rightarrow \min$;
2. Patērētā enerģija, $(W, J) \rightarrow \min$;
3. Kompaktēšanas raksturlielums, $(C_r, mm) \rightarrow \max$;
4. Presēšanas spēks $f_0 \rightarrow \min$;

5. Paraugu izturība pēc 28 dienām, P (MPa) $\rightarrow \max$;
6. Produkta izmaksas (L_s) $\rightarrow \min$;

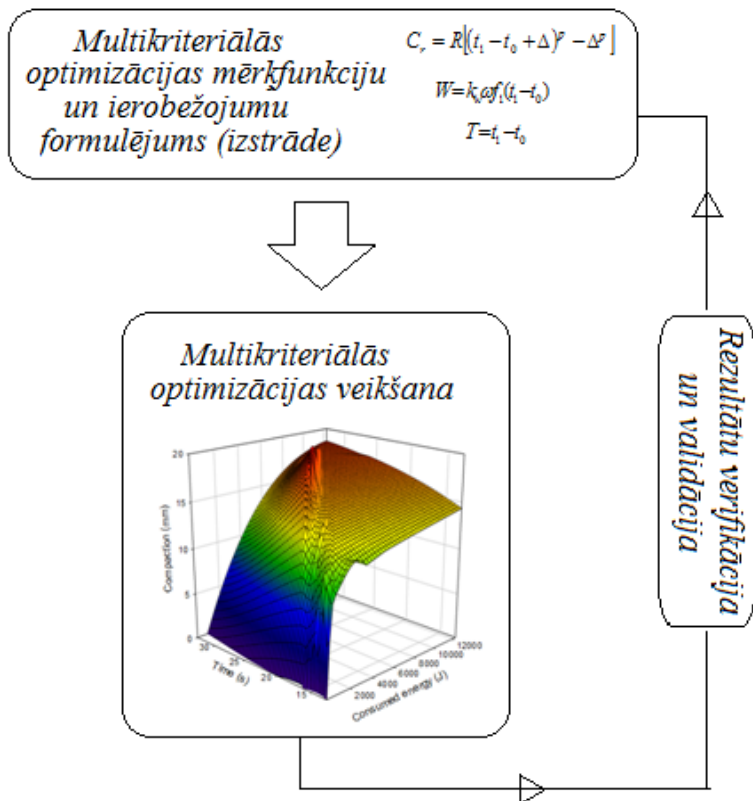


3. att. Pareto robežas analīze

Ar programmatūras EDAOpt palīdzību tika atrasti multikriteriālās optimizācijas uzdevumu atrisinājumi Pareto robežas un Pareto virsmas [13, 14, 15] interpretācijā.

Nodaļā ir veikta Pareto robežas (3. att.) un virsmas analīze. Analizējot 3. attēlu, var konstatēt, ka iegūtā Pareto robeža apgabalā c krasi maina savu slīpumu, paliek lēzenāka. Tieši šajā apgabalā var iegūt betona paraugu izturību, kas vienāda ar apmēram 55 MPa, kas ir par 44% lielāka par paraugu vidējo vērtību, nepatērējot enerģijas daudzumu lielāku par 2000 J dotajā gadījumā.

Nodaļas izstrādātas metodoloģijas posma algoritmu var aplūkot 4. attēlā. Šajā algoritmā arī ir paredzēta rezultātu verifikācija un validācija, nepieciešamības gadījuma mērķfunkciju un ierobežojumu uzlabošanai, precizēšanai vai izmaiņai.



4. att. Nodaļas izstrādātas metodoloģijas posma algoritms

Piektajā nodaļā ir formulēta kopumā metamodelēšanas pielietojuma metodika dinamisku sistēmu analizē un optimizācijā. Ir izveidots metodikas algoritms (5. att.) struktūrshēmas veidā, balstoties uz iepriekšējām nodaļām, un aprakstīta izstrādātas metodikas gaita.

SECINĀJUMI

1. Promocijas darbā veikta vispusīga literatūras analīze par dinamisko sistēmu metamodelēšanu, eksperimentu plānošanu un analīzi, par daudzkriteriālo optimizāciju, kā arī par augstās stiprības betonu formēšanas tehnoloģiskajiem procesiem
2. Izstrādāta metamodelēšanas metodika dinamisko sistēmu analīzei, kura satur 1) dinamiskā pārejas procesa vienkāršota modeļa izveidi ar galīga skaita parametriem, 2) dinamiskā procesa ieejas faktoru izvēli, 3) naturālo un skaitlisko eksperimentu plāna izveidi un izpildi, 4) procesa metamodela izveidi, pielietojot parametriskās un neparimetriskās aproksimācijas metodes, 5) procesa daudzkriteriālās optimizācijas veikšanu, 6) rezultātu verifikāciju un validāciju.
3. Veikts izstrādātās metodikas pielietojums betona vibroprecēšanas procesa analīzei un optimizācijai.
4. Veikti betona vibropresēšanas formēšanas eksperimenti ar materiālu dinamiskās testēšanas iekārtām un noteikta paraugu stiprība.
5. Ir izstrādāti dinamiskā (vibropresēšanas) procesa formēšanas sakarību metamodeli.
6. Ir izstrādāti metamodeli, kas raksturo kompaktēšanas procesa parametru atkarību no tehnoloģiskā procesa parametriem.

7. Izmantojot metamodelēšanas pieeju, ir veikta vibropresēšanas procesa daudzkritēriālā optimizācija, kā rezultātā var saskatīt pie kādiem minimālajiem enerģijas patēriņiem var panākt paraugu stiprību par 44% lielāku par paraugu stiprības vidējo vērtību.

8. Turpmākā darba virzieni – metamodelēšanas metodikas attīstīšana citiem dinamiskiem procesiem, kuriem eksperimentu atbildes ir stacionāri un nestacionāri procesi.

LITERATŪRAS SARAKSTS

[1] Atkinson C., Kühne T., "Model-Driven Development: A Metamodeling Foundation" *IEEE Software*, vol. 20, no. 5, Sep/Oct, 2003, p. 36-41

[2] Auzins J. (2004). *Direct optimization of experimental designs. Proc. of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization conf.*, Albany, NY, 2004, CD edition, AIAA paper No: 2004-4578

[3] Auzins J., Janusevskis A. (2007). *Eksperimentu plānošana un analīze*, Rīga, RTU, ISBN 97-9984-32-157-8

[4] Audze P. and Eglājs V. (1977). *New approach to the design of multifactor experiments. Problems of Dynamics and Strengths 35*, Zinatne Publishing House, Riga, 104-107

[5] Bézivin, J., "In Search of a Basic Principle for Model Driven Engineering," *Upgrade*, vol. 5, no. 2, 2004, p. 21-24

[6] Butler N. A. (2001). *Optimal and Orthogonal Latin Hypercube Designs for Computer Experiments. Biometrika* 88, 847-857

- [7] Cleveland W. S., and Grosse E. (1991). *Computational Methods for Local Regression*. *Statistics and Computing*, 1, 47-62
- [8] Djuric, D., Gašević, D., Devedžić, V.,: "The Tao of Modeling Spaces", in *Journal of Object Technology*, vol. 5. no. 8, November-December 2006, pp. 125-147
- [9] Fan J. and Gijbels I. (1996). *Local Polynomial Modelling and Its Applications*. Chapman & Hall, London
- [10] Janushevskis, J. Auzins, T. Akinfiyev, A.Boyko, A comparative analysis of global search procedures *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 2004, Vol.10, No.4, 235-250
- [11] Januševskis J. *Metamodelēšanas metožu izstrāde un pielietojums mehānisku sistēmu analīzē un optimizācijā, disertācija, Rīga, 2008*
- [12] Koehler J. R. and Owen A. B. (1996). *Computer experiments*. In *Handbook of Statistics*, Vol. 13., eds. S. Ghosh and C. R. Rao., Elsevier, p. 261-308.
- [13] Marler R.T., Arora J.S. *Survey of multi-objective optimization methods for engineering Struct Multidisc Optim* 26, 369–395 (2004)
- [14] C. A. Mattson and A. Messac. *Pareto frontier based concept selection under uncertainty, with visualization. Optimization and Engineering*, 6(1):85–115, 2005
- [15] Messac A., Mullur A., *MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION: CONCEPTS AND METHODS OPTIMIZATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL SYSTEMS 2007 World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 59622*
- [16] Montgomery D. C. (2005), *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed., John Wiley & Sons, New York

[17] Wang G., Shan S. (2007). *Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization. Journal of Mechanical Design, Vol. 129, Issue 4, p. 370-380*

[18] Yang K., Trewn J. *Multivariate Statistical Methods in Quality Management. McGraw-Hill, 2004*

[19] Ахвердов и.н. *основы физики бетона Москва, Стройиздат, 1981, с.373*

[20] Баженов Ю. М. «Технология бетона» © Издательство «Высшая школа», 1987, с изменениями
<http://bibliotekar.ru/spravochnik-176-tehnologia-betona/1.htm>