

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības fakultāte  
Transportbūvju institūts

**Verners Straupe**

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorants

**PASTĀVĪGĀS UN MAINĪGĀS SLODZES  
IETEKME UZ VANŠU TILTU NESOŠO  
ELEMENTU KOPDARBĪBU**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Promocijas padome „RTU P-06”

Zinātniskais vadītājs  
Dr. sc. ing., profesors  
**Ainārs PAEGLĪTIS**

**Rīga 2013**

UDK 624.5(043.2)  
St 693 p

Straupe V. Pastāvīgās un mainīgās  
slodzes ietekme uz vanšu tiltu  
nesošo elementu kopdarbību.  
Promocijas darba kopsavilkums.-  
Rīga RTU, 2013.-26 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas  
padomes „RTU P-06”  
2013.gada 28. jūnija  
lēmumu, protokols Nr. 6-2013

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu  
projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai – 2”.



ISBN 978-9934-10-463-3

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. 22. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Prof., Dr. sc. ing. Ivars Radiņš  
Rīgas Tehniskā universitāte

Prof., Dr. sc. ing. Algirdas Juozapaitis  
Viļņas Gedimina Tehniskā universitāte

Prof., Dr. sc. ing. Siim Idnurm  
Tallinas Tehnoloģiskā universitāte

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.

Verners Straupe .....

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 3 pielikumus, 77 ilustrācijas, kopā 138 lappuses. Literatūras sarakstā ir 104 nosaukumi.

## DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### **Tēmas aktualitāte**

Pēdējos gadu desmitos pasaulē notiek strauja vanšu sistēmas tiltu attīstība. Palielinās vanšu tiltu skaits, dažādojas to konstruktīvie risinājumi, pilnveidojas dažādu vanšu sistēmu aprēķina metodika. Ieviešot jaunus materiālus, ir iespējams pārsegt aizvien garākus laidumus. Vienlaikus vanšu tilti kļūst ekonomiski izdevīgāki, samazinot materiālu patēriņu. Sarežģītu vanšu sistēmu projektēšana prasa aprēķina metožu pilnveidošanu (vispārināšanu), lai atrastu no ekonomiskā viedokļa racionālus risinājumus, vienlaicīgi nesamazinot konstrukciju drošību. Stiepes spēku regulēšana vantīs ir veids, kā samazināt piepūles vanšu tilta pārējos nesošajos elementos – stinguma sijā un pilonos, līdz ar to atvieglojot to konstruktīvos risinājumus un samazinot izmaksas.

Promocijas darba autors strādā pie analītiski iegūtām likumsakarībām, kas parāda vanšu sistēmas tiltu stinguma sijas, pilonu un vanšu mehānisko un ģeometrisko īpašību ietekmi uz pārvietojumiem un piepūlēm sistēmā. Ar būvmehānikas metodēm ir iegūtas pētāmās problēmas aprakstošas nepārtrauktas funkcijas, kas ir diferencējamas un tādejādi piemērotas ekstrēmumu meklēšanai. Laba izpratne par šo rādītāju kopsakarībām ļauj izdarīt pietiekami precīzus sākotnējos elementu īpašību pieņēmumus tālākai pārbaudei ar galīgo elementu metodi (GEM).

### **Darba mērķis:**

Izstrādāt vanšu tiltu nesošo elementu kopdarbības teorētiskas analīzes jaunu metodiku, kas ļauj novērtēt ģeometrisko un mehānisko parametru ietekmi uz konstrukcijas darbību un nestspējai izvirzītiem

kritērijiem. Atšķirībā no tradicionālām analīzes metodēm, iegūtajām likumsakarībām jābūt nepārtrauktām un diferencējamām funkcijām visā vanšu tiltam reāli iespējamu parametru apgabalā; tām jāatbilst pārbaudes kritēriju izmaiņas ātruma atkarību no ģeometrisko un mehānisko izejas lielumu variācijām.

### **Darba uzdevumi:**

- 1) Izstrādāt jaunu metodiku, ar kuru var analītiski pētīt simetriskas vanšu sistēmas pārvietojumu – piepūļu likumsakarības kā nepārtrauktas funkcijas.
- 2) Izmantojot izstrādāto metodiku, pētīt vanšu sistēmas tiltu darbību vienmērīgi izkliedētas un kustīgas koncentrētas slodzes ietekmē, analizējot stieņa liektās ass diferenciālvienādojumu; noteikt novatoriskas „aktīvo” vanšu sistēmas efektivitāti kustīgās slodzes radītu piepūļu samazināšanā.
- 3) Noteikt racionālu stinguma sijas sadalījumu, kas ļauj samazināt spriegumus laiduma konstrukcijā un vantīs.
- 4) Parādīt izstrādātās metodikas efektivitāti ar pielietojumu praktiskos piemēros.

### **Aizstāvēšanai izvirzīts:**

- 1) Vanšu tiltu nesošo elementu kopdarbības analīzes jauna metodika ģeometrisku un mehānisku parametru ietekmes novērtēšanai, izmantojot nepārtrauktas un diferencējamas funkcijas.
- 2) Izstrādātās metodikas pielietojums novatoriskas „aktīvu” vanšu sistēmas darbības principu noteikšanai.

### **Zinātniskā novitāte**

Tradicionāli vanšu sistēmas tiltu elementu racionālu šķēsgriezumu un izvietojuma noteikšana ir iteratīvs process, kurā ar lielu galīgo elementu metodes aprēķinu skaitu pakāpeniski tuvojas risinājumam, kas

apmierina gan konstrukcijas darbībai izvirzītos robežnosacījumus, gan ekonomiskos apsvērumus.

Šajā promocijas darbā vanšu tiltu nesošo elementu kopdarbība pirmo reizi aprakstīta ar analītiskām nepārtrauktām, diferencējamām funkcijām, kas iegūtas ar precīzām būvmehānikas metodēm analizējot sistēmas deformēto stāvokli un ļauj meklēt elementu savstarpējās ietekmes nozīmīgumu, kā arī noteikt iespējamās ekstrēmuma punktus.

Pamatojoties uz šādu analīzes pieeju, dotas vairākas rekomendācijas racionāliem sistēmas ģeometrijas uzlabojumiem, kā arī izstrādāta metodika ērtam vanšu tilta elementu mehānisko parametru pamatotam pieņemumam tālākai pārbaudei ar galīgo elementu metodes aprēķiniem.

Papildus ar promocijas darbā izstrādāto analīzes metodiku, ir novērtēta „aktīvas” vanšu sistēmas lietderība. Ar aktīvu vanšu sistēmu šeit jāsaprot mehānisms, kas atkarībā no kustīgās slodzes novietojuma uz brauktuves, piespriedz atsevišķas vantis, samazinot gan pārvietojumus, gan piepūles stinguma sijā. Šādas sistēmas izpēte pavērtu iespēju vanšu izgatavošanā izmantot jaunus materiālus, kuri izceļas ar augstu stiprību, taču zemā elastības moduļu dēļ tajās rodas būves lietojamības kritērijiem neatbilstoši lieli pārvietojumi.

### **Pētījuma praktiskā nozīme**

Latvijas tiltu būvniecībā ir jāattīsta materiāli maz ietilpīgas un ekonomiski izdevīgas tiltu konstrukcijas. Vanšu tiltu ekonomiskā efektivitāte ir atkarīga no nesošo konstrukciju nestspējas racionāla izlietojuma, tādēļ nepieciešama zinātniski pamatota sistēmas elementu kopdarbības un savstarpējās ietekmes teorētiska izpēte.

Latvijā priekšizpētes stadijā ir ielānāti vairāki liela laiduma tilti, kuru centrālo laidumu pārsegšanai būs nepieciešams izmantot vanšu vai iekārto sistēmu:

- tilts pār Daugavu Rīgā (Ziemeļu šķērsojums ar centrālo laidumu ~ 400m);
- tilts pār Daugavu Jēkabpilī (tilta pārejas garums 420m, centrālais laidums 260m; 2013. gadā AS „Ceļuprojekts” ir izstrādājis tilta skiču projektu, kurā ņemti vērā šajā promocijas darbā iegūti secinājumi);
- tilts pār Daugavu pie Salaspils (tilta pārejas garums ~1200m, centrālais laidums ~440m).

Iegūtie rezultāti ļauj meklēt racionālus, drošus un vienlaicīgi arī novatoriskus vanšu tilta ģeometriskos un mehāniskos parametrus. Izstrādāto analīzes metodiku var izmantot ne tikai tiltu konstrukcijām, bet arī cita veida iekārto pārsegumu (stadionu jumtu, segto stāvvietu jumti utt.) projektēšanai.

### **Pētījuma ierobežojumi**

Matemātiskajā izvedumā ir iekļaujami šādi izejas dati:

- 1) vanšu sistēmas ģeometriskie parametri:
  - a) laidumu garums un sadalījums paneļos (attālums starp vanšu enkurmezglēm);
  - b) vanšu skaits;
  - c) vanšu slīpuma leņķis;
  - d) pilonu augstums;
- 2) vanšu sistēmas elementu mehāniskie parametri:
  - a) vanšu stiepes stingums ( $E_v F$ );
  - b) stinguma sijas lieces stingums ( $E_s I_s$ );
- 3) slogojumi:

- a) pastāvīgās (pašsvara) slodzes (tās iespējams vispārināt kā funkcijas no nesošo elementu ģeometriskajiem izmēriem);
- b) lietderīgās slodzes – spēkā esošajiem standartiem atbilstošas kustīgās transporta slodzes dažādās to nelabvēlīgā izvietojuma kombinācijās.

Ar piedāvāto analīzes metodiku jāatrod grafiski attēlojama definēto izejas datu ietekme uz galvenajiem robežnosacījumiem:

- 1) stinguma sijai pieļaujamie pārvietojumi;
- 2) pieļaujamie spriegumi vantīs;
- 3) pieļaujamie spriegumi stinguma sijā;
- 4) minimālo iespējamo lieces momentu iegūšanas apsvērumu meklēšana.

Vispārinātais matemātiskais izvedums ir ērti pielāgojams populārākajām vanšu tiltu sistēmām:

- 1) ar diviem piloniem un vienu centrālo laidumu (simetriska shēma);
- 2) ar diviem piloniem, vienu centrālo un diviem malējiem laidumiem (simetriska trīslaidumu shēma);
- 3) ar vienu pilonu un vienu centrālo laidumu (nesimetriska shēma);
- 4) ar vienu pilonu, vienu centrālo un vienu malējo laidumu (nesimetriska divlaidumu shēma).

Izdarītā pētījuma pamatmērķis ir iegūt matemātiski pamatotu priekšstatu par kopsakarībām starp definētajiem izejas datiem un ierobežojošajiem parametriem. Šai analīzei jākalpo kā līdzeklim mērķtiecīgam vanšu sistēmas elementu ģeometrisko un fizikālo īpašību pieņemumam, kas tālāk jāpārbauda ar detalizētu aprēķinu katram konkrētam gadījumam. Tādēļ šajā darbā virkne faktoru nav apskatīti:

- apskatīta tikai konstrukcijas plakanā shēma, neņemot vērā slodžu šķērssadalīšanos u.c. telpiskus efektus;

- apskatīta tikai pašsvara un lietderīgo slodžu ietekme, neievērojot citas iedarbes – temperatūras gradients, balstu sēšanās, vēja, sniega un ledus slodzes, ārkārtas iedarbes (transporta līdzekļu triecieni u.c.);
- veikta tikai statiskās darbības analīze, neievērojot vibrāciju u.c. dinamisko iedarbju efektus.

### **Pētīšanas metodika un teorētiskais pamats**

Promocijas darbā ir piedāvāts risinājums, kurā klasiskas (precīzās) būvmehānikas metodes tiek izmantotas kompleksas statiski nenoteicamas, ģeometriski un fizikāli nelineāras sistēmas analīzei.

Vanšu sistēmas darbības izpēte veikta divos veidos. Vispirms veikta induktīva analīze – zinot vispārīgas prasības, kādas tiek izvirzītas pabeigtaijai konstrukcijai, ir nedefinēti sasniedzamie kritēriji (piemēram, minimālie iespējamie lieces momenti vai stiepes spriegumi stinguma sijā) un meklēti sistēmas izejas lielumi, kas to nodrošina. Šajā gadījumā ir atrastas matemātiskas funkcijas, kurās meklējama kritērijs ir mainīgais, bet funkcijas vērtības – kāds no sistēmas ģeometriskiem vai mehāniskiem parametriem.

Pēc tam izdarīts deduktīvs izvedums, kas paredzēts jebkuras vanšu sistēmas analīzei un meklē funkcijas, kuras uzrāda sistēmas ģeometrisko un mehānisko parametru ietekmi uz gala pārbaudēm (lieces momenti, spriegumi, pārvietojumi).

Abos gadījumos stinguma sijas darbība ir pētīta ar precīzām būvmehānikas metodēm. Pirmajā gadījumā risināts nepārtrauktas daudzlaidumu sijas liektās ass diferenciālvienādojums, bet otrā gadījumā tilta laiduma konstrukcija pētīta kā nepārtraukta sija uz elastīgiem balstiem, izmantojot pārvietojumu metodi. Vantis apskatītas kā tikai stiepei pakļauti stieņi, ņemot vērā to

galapunktu pārvietojumu nelineāro atkarību no stiepes spēka vantī, kas saistīts ar visas vants pagriešanas vertikālā plaknē. Atsevišķos gadījumos iegūtās vairāku argumentu funkcijas ļauj konstruēt arī kāda parametra ietekmes līniju.

Abiem minētajiem spriešanas veidiem vispirms izdarīts teorētisks izvedums, pēc tam tā iespējas parādītas ar piemēru un visbeidzot iegūto rezultātu ticamība un precizitāte pārbaudīta, atsevišķus atrasto funkciju raksturīgos punktus pārbaudot ar galīgo elementu metodes (GEM) aprēķinu. Īpaša vērība šajās pārbaudēs pievērsta zonai ap iegūtu optimālo risinājumu (funkciju maksimumi un minimumi). Minētās trīs izpētes stadijas ir aprakstītas promocijas darba 2., 3 un 4. nodaļā.

Aprakstītā darba struktūra attēlota sekojošā shēmā.

#### Promocijas darba struktūra (pa apakšnodaļām)

Pētījuma virziens Pētījuma posms	Augšupejoši (induktīvi) spriedumi			Lejupejoši (deduktīvi) spriedumi. Vispārināts izvedums
	Pastāvīgās slodzes	Mainīgās slodzes		
		Kustīgās slodzes ietekme	"Aktīvas" sistēmas darbība	
Teorētiskā pamata izstrādāšana	2.2	2.3	2.4	2.5
Pielietojuma izpēte ar piemēriem	3.2; 3.5	3.3	3.4	3.6
Rezultātu verifikācija	4.1	pielik.	pielik.	4.2

Teorētiskie izvedumi pārsvarā ir izdarīti ar minētajām būvmehānikas metodēm. Iegūto funkciju grafiskai attēlošanai, kā arī ekstrēmpunktu meklēšanai izmantota inženieraprēķiniem paredzēta programmatūra MathCAD, kurā noprogrammēti piedāvāto risinājumu

algoritmi. Atsevišķu punktu pārbaudes veiktas ar nelineāras sistēmas modelēšanu GEM programmā LIRA.

Promocijas darbā ir izstrādāta pietiekama teorētiskā bāze, lai iegūtos matemātiskos algoritmus dažādām vanšu tiltu shēmām iestrādātu datorprogrammā, kas kalpotu kā līdzeklis sākotnējam sistēmas ģeometrisko un mehānisko parametru pieņēmumam.

### **Darba sastāvs un apjoms**

Promocijas darba pētījuma teorētiskajā daļā, kas galvenokārt atspoguļota 2. nodaļā, daudzviet ir dotas tikai galīgās izvēstās funkcijas. Pilns izvedums, kā arī ar MathCAD noprogrammētie algoritmi ir pievienoti darba pielikumā. Konspektīvs raksturs ir sadaļām par vēlamās lieces momentu epīras iegūšanu no pastāvīgām slodzēm, jo šis pētījums ir jau veikts promocijas darba autora maģistra darbā „Vanšu sistēmu tiltu vanšu regulēšanas aprēķina metodikas analīze” (2004.).

Promocijas darbs sastāv no darba vispārējā raksturojuma, piecām nodaļām, secinājumiem un izmantotās literatūras saraksta.

### **Darba aprobācija un publikācijas**

Promocijas darba rezultāti ir publicēti sekojošos zinātniskos žurnālos un apspriesti sekojošās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

Raksti zinātniskajos žurnālos, kurus indeksē starptautiskā datu bāze SCOPUS:

- Straupe V., Paeglitis A. Analysis of Interaction between the Elements in Cable Stayed Bridge // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – Vol.7, No.2. (2012.) pp 84 – 91.  
ISSN: 1822-427X

- Straupe V., Paeglītis A. Analysis of Geometrical and Mechanical Properties of Cable-Stayed Bridge // *Procedia Engineering*. – Vol. 57 (2013, Elsevier Ltd.) pp 1086 – 1093.  
*ISSN: 1877-7058*

Raksts konferenču rakstu krājumā, kuru indeksē starptautiskā datu bāze SCOPUS (ar ziņojumu starptautiskā zinātniskā konferencē):

- Straupe, V., Paeglītis, A. (2012.) Structural Reliability of Cable Stayed Bridges Based on Analysis of Deformation // IABMAS 2012 „6<sup>th</sup> International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management”, Stresa, Lake Maggiore, Italy, 8.-12. July, 2012; *Proc. In: Biondini, F., Frangopol, D., M. (Eds). Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability. Taylor & Francis Group, London, 3880-3887.*  
*ISBN: 9780415621243*

Raksts RTU zinātnisko rakstu krājumā (žurnāls)

- Straupe V., Paeglītis A. Simetriskas vanšu sistēmas ar vienu centrālo laidumu analītiska izpēte // RTU zinātniskie raksti. 2. sēr., Būvzinātne. - 5. sēj. (2004.), 236.-245. lpp.
- Straupe V., Paeglītis A. Daži vanšu aprēķinu aspekti vanšu sistēmas tiltiem // RTU zinātniskie raksti. 2. sēr., Būvzinātne. - 4. sēj. (2003.), 216.-223. lpp.

Raksti konferenču pilna teksta rakstu krājumā (ar ziņojumu starptautiskā zinātniskā konferencē)

- Straupe V., Paeglītis A. Cable-Stayed Bridge Elements Lifetime Optimization Model // 18th IABSE Congress „Innovative Infrastructures - Toward Human Urbanism”, Korea Republic, Seoul, 19.-21. September, 2012. - pp 1-8.  
*ISBN: 978-3-85748-127-7*

- Straupe V., Paeglītis A. Mathematical Bases of Interaction between Elements in Cable Stayed Bridges // 35th Annual Symposium of IABSE Taller, Longer, Lighter, Meeting Growing Demand with Limited Resources: Proceedings, United Kingdom, London, 20.-23. September, 2011. - pp 1-8.  
*ISBN: 9780707971223*

Raksti konferenču tēžu krājumā (ar ziņojumu starptautiskā zinātniskā konferencē)

- Straupe V., Paeglītis A. Optimization of Cable-Stay Bridge Elements // Riga Technical University 53rd International Scientific Conference: Dedicated to the 150th Anniversary and the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni: Digest, Latvia, Riga, 11. – 12. October, 2012. – p 406.  
*ISBN: 9789934103605*
- Straupe V., Paeglītis A. Vanšu tiltu nesošo elementu kopdarbības analīze // Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress "Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte": sekcija "Tehniskās zinātnes": tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24. – 27. oktobris, 2011., 59. lpp.  
*ISBN: 9789934102271*

Ziņojumus starptautiskā zinātniskā konferencē bez tēzēm

- Straupe V., Paeglītis A. Vanšu tiltu nesošo elementu kopdarbības analītiska izpēte // RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference, sekcija „Būvzinātne”, Rīga, Latvija, 2010.g. 11.-15. oktobris

Dalība valsts pētījumu programmā

- Valsts pētījumu programmas Nr.2011. 10-4/VPP-5 projekts Nr.4 „Drošas un ilgtspējīgas autoceļu transporta infrastruktūras attīstība (DIATIA)”

## DARBA SATURS

### **Pirmā nodaļa**

Mūsdienu vanšu tiltu vēsturiskā attīstība ir aizsākusies 19. gs vidū ar vairākiem neveiksmīgiem šādas konstrukcijas būvniecības mēģinājumiem. Pirmais veiksmīgais vanšu tilts (mūsdienu izpratnē) ir uzbūvēts Zviedrijā 1955. gadā; tā vantīm jau tika izmantotas vītas tērauda troses. Nākamajās desmitgadēs sākās strauja vanšu tiltu konstruktīvo risinājumu un aprēķina principu attīstība. Šodien pasaulē ir trīs vanšu tilti, kuru centrālais laidums pārsniedz 1 km.

Promocijas darbā konspektīvi aprakstīta vanšu tiltu nesošo elementu klasifikācija un parādītas populārākās šo konstrukciju shēmas, kas galvenokārt atšķiras ar pilonu skaitu un vanšu izvietojumu. Vairāk uzmanības pievērsts vanšu tiltu aprēķinu principiem, starp kuriem būtisku lomu ieņem vanšu spriegošanas (regulēšanas) koncepcija un vēlamais rezultāts. Populārākie vanšu spriegošanas aprēķina apsvērumi ir iekļauti šādās tradicionāli pielietojamās metodēs:

- optimizācijas metode;
- nulles pārvietojumu metode;
- spēku līdzsvara metode;
- virtuālo darbu princips.

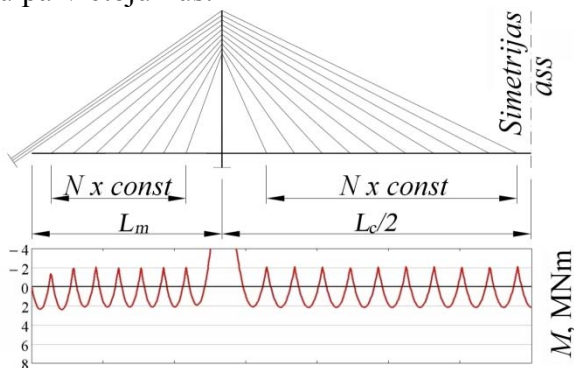
Nodaļas nobeigumā pamatota vajadzība pēc šajā promocijas darbā veiktā pētījuma.

### **Otrā nodaļa**

Aprakstīti izstrādājamās aprēķinu metodikas principi un strukturēta veicamo darbību secība.

Analizēta vanšu tilta centrālā laiduma darbība vienmērīgi izkliedētas slodzes (piem., pašsvars) ietekmē. Kā mērķis, kas jāsasniedz ar vanšu regulēšanu, ir

nodefinēta tādas epīras iegūšana, kurā lielāko pozitīvo un negatīvo lieces momentu absolūtās vērtības ir vienādas – skat. 1. attēlu. Iespējams uzdevumu risināt arī ar citiem kritērijiem. Aprēķina izvedums parāda, ka šāda momentu epīra veidojas pie noteikta stinguma sijas elastīgo balstu (vanšu) vertikālā pārvietojuma. Atrisinot sijas liektās ass diferenciālvienādojumu no izklaidētās slodzes un vanšu stiepes spēku vertikālajām komponentēm, ir atrastas funkcijas, kas parāda stinguma sijas un vanšu stinguma ietekmi uz meklētajiem pārvietojumiem. Ievērojot pieņemto vanšu slīpuma leņķi (tas ir saistīts ar pilona augstumu) un tās pagriešanās efektu sijai deformējoties, ir noteikti tādi parametri, kas dod meklētos raksturīgo mezglu pārvietojumus.

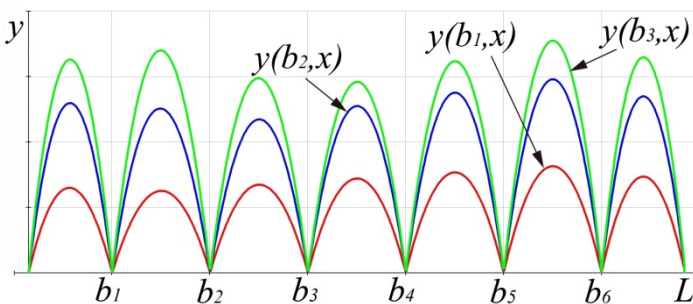


1. att. Vēlamā lieces momentu epīra

Tādi paši aprēķina apsvērumi atkārtoti, meklējot iespējas samazināt arī spriegumus stinguma sijā no pašsvara slodzes. Šajā aprēķinā ir ievērtēts asspēks no vanšu stiepes spēku horizontālajām komponentēm, kas ir atkarīgas no laiduma konstrukcijas būvniecībā izmantotās montāžas metodes.

Doti arī priekšlikumi vanšu enkurmezglu racionālam izvietojumam stinguma sijā, kas palīdz samazināt maksimālos spriegumus.

Otrajā nodaļā atrasts risinājums, kas parāda kustīgo transporta slodzi reprezentējoša koncentrēta spēka ietekmi uz lieces momentiem stinguma sijā. Mazākās teorētiski iespējamās lieces momentu ekstrēmvērtības iespējams iegūt, „aktīvi” piespriedzot un atlaižot atsevišķas vantis, koncentrētajam spēkam virzoties pāri tiltam. Ir izanalizēti šādas novatoriskas „aktīvas” vanšu sistēmas darbības principi. Tie parāda, ka vēlamās lieces momentu epīras iegūšanai, neviena vants nav jāatbrīvo zem stiepes spēka vērtības, kāda ir no pastāvīgajām slodzēm; tātad nav jābaidās par kādas vants izslēgšanos no darbības. Šo īpašību demonstrē arī atbilstošie enkurmezglu „aktīvās” darbības pārvietojumi, kuri visi ir pozitīvi (uz augšu vērsti) – skat. 2. attēlā nodemonstrēto trīs patvaļīgi izvēlētu enkurmezglu „aktīvo” pārvietojumu atkarību no koncentrēta spēka novietojuma.

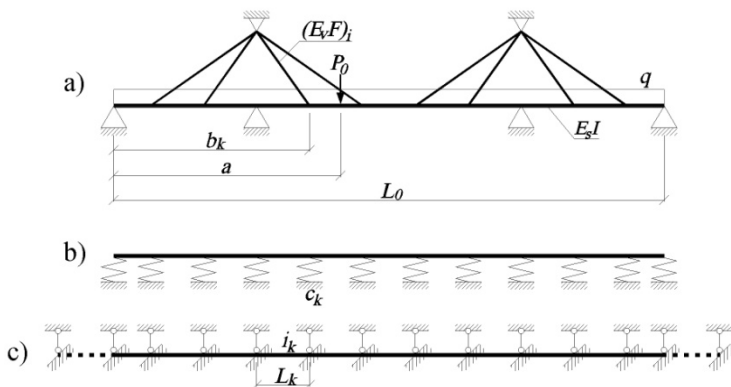


2. att. Enkurmezglu „aktīvo” pārvietojumu atkarība no koncentrēta spēka novietojuma  $x$

Līdz šim aprakstītie apsvērumi ir tendēti uz tādu vanšu sistēmas izejas datu meklēšanu, ar kuriem ir panākams kāds no definētiem rezultātiem.

Darba turpinājumā ir izdarīts matemātisks izvedums, kas parāda patvaļīgi izvēlētu izejas datu ietekmi uz pārbaudāmiem kritērijiem. Šis izvedums ir

iegūts, ar pārvietojumu metodi apskatot laiduma konstrukciju kā siju uz elastīgiem starpbalstiem vanšu mezglos (skat. 3. att.). Atbilstošos balstu atsperes koeficientus nosaka vanšu parametri – stingums, slīpums, garums. Nekustīgus balstus (laiduma galos un pilonu šķērsgriezumā) reprezentē bezgalīgi liels atsperes koeficients. Tādejādi stinguma sijas izvedums ir izmantojams jebkurai vanšu sistēmai, atsevišķā aprēķinā nosakot pilonu skaita un izvietojuma, kā arī vanšu ģeometrisko un mehānisko parametru ietekmi uz atsperes koeficientiem.



3. att. a – tilta shēma; b – aprēķina shēma; c – pārvietojumu metodes pamatsistēma

Atsperes koeficienta atkarība no vanšu parametriem ir nelineāra, jo slīpa vants pagriežas, ja tās viens gals pārvietojas virzienā, kas nav paralēls vants garenasij. Tomēr, apskatot lēzenāko (ar mazāko praksē izmantotu slīpuma leņķi) iespējamo vanti pie tiltu būvnormatīvos pieļautām maksimālām konstrukcijas deformācijām, šī nelineārā efekta ietekme uz atsperes koeficienta vērtību nepārsniedz 1,3%. Var uzskatīt, ka ietekme ir nebūtiska.

Otrs vērā ņemams stieptas slīpas vants nelineāras darbības efekts ir tās pašsvara nokares atkarība no stiepes

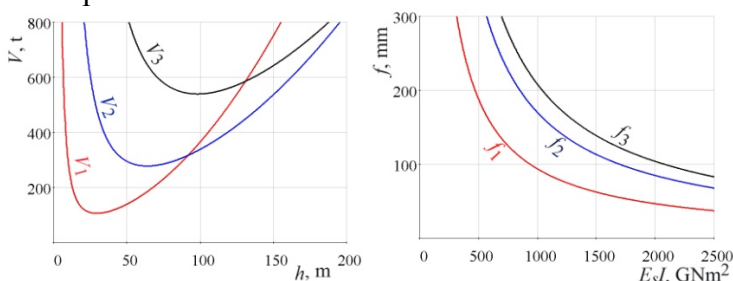
spēka. Šo efektu var ievērtēt, reālā vants materiāla elastības moduļa vietā izmantojot tā idealizēto vērtību, kas ir funkcija no sprieguma vantī. Piedāvātā analīzes metodika ļauj elastības moduli lietot kā funkciju ar nezināmo – stiepes spēku vantī no apskatāmā slogojuma.

### Trešā nodaļa

Ar atrastajiem vanšu tiltu elementu kopdarbības analīzes metodikas izvedumiem ir apskatīti divu konstrukciju piemēri:

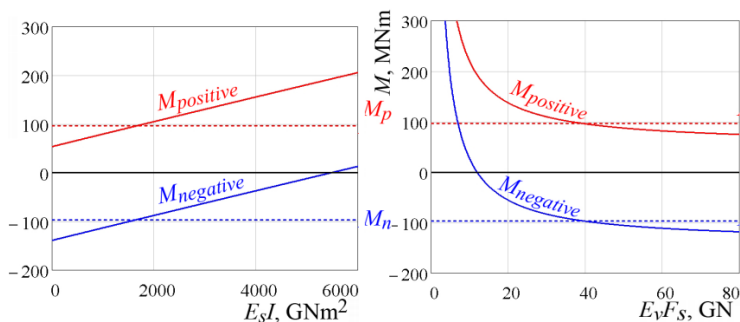
- 1) sistēma ar diviem piloniem, vienu centrālo laidumu ( $L = 231\text{m}$ ) un trim simetriski izvietotiem vanšu pāriem;
- 2) trīslaidņu sistēma (laidumu shēma:  $80\text{m} + 260\text{m} + 80\text{m}$ ) ar diviem piloniem un simetriski izvietotām vantīm; šāda konstrukcija ir izstrādāta jauna tilta pār Daugavu Jēkabpilī skiču projektā (2013.g.).

Pirmajai konstrukcijai ir nodefīnēts kritērijs – no vienmērīgi izkliedētas pašsvara slodzes jāiegūst stinguma sijas lieces momentu epīra ar katrā panelī pēc absolūtās vērtības vienādām lieces momentu ekstrēmvērtībām. Atrasti stinguma sijas mezglu punktu pārvietojumi, kas nodrošina šī nosacījuma izpildīšanos, kā arī atbilstošie vanšu parametri.

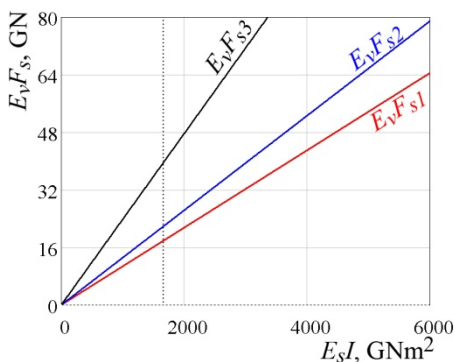


4. att. Vants tērauda patēriņa atkarība no pilona augstuma (kreisajā pusē) un enkurmezglu pārvietojuma atkarība no stinguma sijas  $E_s I$  (labajā pusē)

Ņemot vērā, ka izmantotā analītiskā metodika dod funkcijas, kas parāda izejas datu ietekmi uz izvirzīto robežnosacījumu, ir iespējams grafiski attēlot kopsakarības, kas palīdz atrast ērtāko (ekonomiskāko) veidu kā panākt vajadzīgo rezultātu. Dažas no raksturīgām kopsakarībām parādītas 4., 5. un 6. attēlā.



5. att. Lieces momentu ekstrēmvērtību atkarība no stinguma sijas (kreisajā pusē) un vanšu (labajā pusē) stinguma



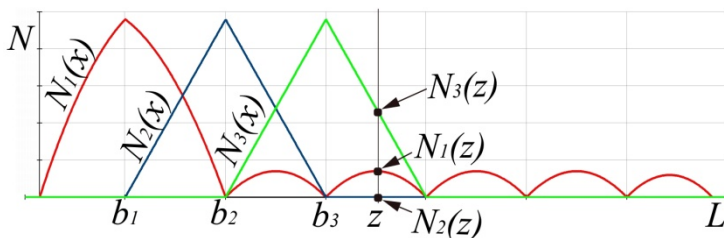
6. att. Trim vantīm nepieciešamo stingumu atkarība no laiduma konstrukcijas stinguma

Rezultāti ļauj secināt, ka no vanšu materiāla ekonomijas viedokļa racionāls ir vanšu paralēls izkārtojums; minimāls vants šķērsgriezums ir izmantojams  $54^\circ$  slīpai vantij, bet vismazākā vanšu kopējā masa ir shēmai ar  $45^\circ$  leņķī izkārtotām vantīm.

Grafiski attēloto funkciju slīpums (pieauguma ātrums) ļauj analizēt stinguma sijas un vanšu šķērsriezuma palielināšanas ietekmi uz nepieciešamajiem mezglu punktu pārvietojumiem.

Kopumā jāsecina, ka sistēmā darbojas fizikāls princips: „stiprākam elementam jāstrādā vairāk” – respektīvi, stingākos elementos rodas lielākas piepūles. Tas noved pie paradoksāla iznākuma: meklēto idealizēto lieces momentu epīru iespējams iegūt, samazinot visu nesošo elementu stingumus (6. att.). Tomēr tas atstāj būtisku iespaidu uz būvnormatīvos definētu lietojamības robežstāvokļa prasību – pieļaujamo pārvietojumu ierobežojums, kas paliek par noteicošo faktoru, izvēloties konstrukcijas parametrus.

Ar šo pašu tilta shēmu ir pārbaudīti arī postulētie spriedumi par kustīgās slodzes ietekmi un lieces momentu samazināšanu līdz teorētiski mazākajām iespējamām vērtībām, izmantojot „aktīvu” vanšu sistēmu. Aprēķina apsvērumi ļauj nedefinēt šādai sistēmai nepieciešamo darbības principu – vanšu „aktīva” darbība nepieciešama tām vantīm, kas enkurotas paneļa ar koncentrētu slodzi abos galos, kā arī laiduma abām malējām vantīm – skat. 7. attēlu.



7. att. Trīs vanšu „aktīvas” regulēšanas spēku atkarība no koncentrētas slodzes novietojuma

Daži eksperimenti ar izstrādāto matemātisko modeli parāda, ka „aktīvās” vanšu sistēmas efektivitāti nosaka rādītājs:

$$\eta = \frac{S_{\text{pastāvīgais}}}{S_{\text{kopējais}}}, \quad (1)$$

kur:  $S_{\text{pastāvīgais}}$  – pastāvīgā piepūle (lieces moments stinguma sijā, vanšu stiepes spēks u.c.);  
 $S_{\text{kopējais}}$  – kopējā maksimālā piepūle, kas iegūta, ņemot vērā mainīgo slodžu ietekmi (transporta slodze, vējš, temperatūra u.c.).

Pieaugot parametra  $\eta$  vērtībai, samazinās „aktīvās” sistēmas efektivitāte un otrādi. Tātad vēriba šādai sistēmai būtu jāpievērš konstrukcijās ar slaidām stinguma sijām un relatīvi zemu pašsvaru.

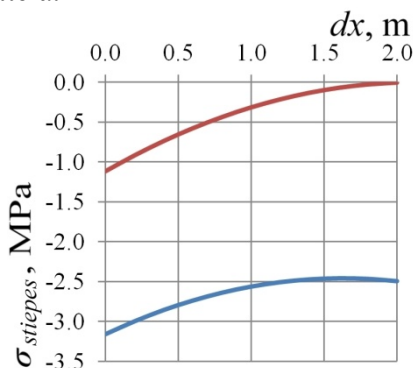
Ieguvumi no spriegumu samazināšanas balstās ne tikai uz ekonomiskiem apsvērumiem, samazinot materiāla patēriņu. Spriegumu svārstību amplitūdas samazināšana (starpība starp maksimālajiem un minimālajiem spriegumiem) ļauj samazināt materiāla noguruma efektu. Ar atsevišķu analīzi ir iespējams vērtēt „aktīvās” sistēmas ietekmi uz būves drošuma indeksu  $\beta$ , kas ir definēts normatīvā LVS EN 1990 „Eirokodekss. Konstrukciju projektēšanas pamatprincipi”.

Ar otru apskatīto vanšu tilta shēmu ir meklēts risinājums maksimālo spriegumu samazināšanai stinguma sijā. Tos ietekmē vanšu enkurmezglos pieliktā spēka horizontālās komponentes, pie tam ietekme uz pabeigtu būvi ir atkarīga no laiduma konstrukcijas montāžas paņēmiena būvniecības laikā. Salīdzināti divi populārākie montāžas paņēmieni:

- laiduma montēšana uz nepārtrauktu turu konstrukcijas un vanšu pievienošana pēc tam;

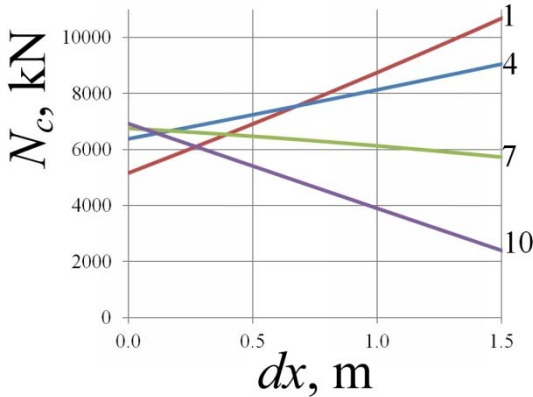
- konsolmontāža, sākot no pilona pakāpeniski pievienojot pa vienam panelim un vienai vantij uz katru pusi.

Tiltam ar dzelzsbetona laiduma konstrukciju (kā apskatītajam piemēram) ir būtiski ierobežot maksimālos stiepes spriegumus, kas veidojas centrālā laiduma vidusdaļā. To efektīgi iespējams izdarīt, modificējot konstrukciju tādā veidā, ka vanšu enkurmezglus izvieto ar mainīgu soli, pie tam katru nākamo virzienā prom no pilona veido īsāku par konstantu lielumu  $dx$ . Šī parametra ietekme uz lielāko stiepes spriegumu laiduma konstrukcijā abiem apskatītajiem montāžas paņēmieniem parādīta 8. attēlā.



8. att. Stiepes spriegumu maksimuma atkarība no parametra  $dx$  (zilā līnija – montāža uz turām; sarkanā līnija – konsolmontāža)

Konstatēts, ka parametrs  $dx$  labvēlīgi ietekmē arī stiepes spēku sadalījumu pa vantīm – proti, iespējams atrast tādu vērtību, kas dod aptuveni vienādu spēku visās vantīs (skat. 9. att.). Tomēr atšķiras no abiem pieminētajiem kritērijiem iegūtā optimālā  $dx$  vērtība. Kompromisu jāizvēlas katrā konkrētā gadījumā individuāli.



9. att. Vanšu stiepes spēku atkarība no parametra  $dx$  (parādīti četri no 10 centrālā laiduma vanšu pāriem)

Ar otru piedāvāto vanšu tilta konstrukciju ir pārbaudīts izstrādātais deduktīvās analīzes izvedums – piepūļu, liektās ass un vanšu spēku funkcionālā atkarība no patvaļīgiem izejas datiem, kuri tiek reducēti uz nepārtrauktas daudzlaidumu sijas ar atspērveida balstiem aprēķinu pēc pārvietojumu metodes.

### Ceturtnā nodaļa

Ar izstrādāto vanšu tiltu analīzes metodiku izdarītie aprēķini ir pārbaudīti ar tradicionāliem līdzekļiem – galīgo elementu metodi, pie tam izmantotajā programmatūrā LIRA ir ņemti vērā sistēmas ģeometriskās un fizikālās nelinearitātes efekti. Tas dod rezultātus atsevišķiem punktiem, respektīvi, dažām raksturīgajām sistēmas izejas parametru kombinācijām. Pārbaudīti punkti, kas trešajā nodaļā ir atzīti par optimāliem kādam no pārbaudes kritērijiem.

Pārbaudīti gan lieces momenti stinguma sijā, gan raksturīgo mezglu pārvietojumi, gan vanšu stiepes spēki. Visos gadījumos ir konstatēta laba sakritība ar jaunās metodikas rezultātiem.

Deduktīvā aprēķina gadījumā nepieciešams jau problēmas risinājuma sākuma stadijā pieņemt vanšu enkurmezglu vietās modelēto elastīgo balstu atsperes koeficientus, kas nelineāri ir atkarīgi no deformācijām beigu stāvoklī. Piedāvāts šo pieņēmumu izdarīt, uzskatot, ka vants tiks noslogota līdz  $1/3$  no pieļaujamā sprieguma. Aprēķins atkārtots ar citiem vants noslodzes rādītājiem (faktiskā sprieguma attiecība pret pārraušanas vērtību, kas pēc būtības atspoguļo drošības koeficientu) un konstatēts, ka izvēlētais pieņēmums dod precīzus rezultātus, jo reālās sagaidāmo spriegumu robežās nelineārais efekts ir maz nozīmīgs (kļūda apskatītajā piemērā nepārsniedza 4%).

### **Piektā nodaļa**

Promocijas darbā apskatītie piemēri demonstrē izstrādātās jaunās analīzes metodikas iespējas, izvēloties racionālus vanšu tiltu izejas parametrus.

Tālejošāks mērķis ir jauno metodiku iestrādāt aprēķinu programmatūrā, kas ļaus ērti analizēt vanšu tilta konstrukcijas plakano shēmu un pamatoti izvēlēties tādas parametrus, kas vienlaicīgi ir gan ekonomiski, gan arī nodrošina būves nestspējai, ilgmūžībai un drošumam būtiskos kritērijus.

Piedāvāta blokshēma teorētiskās bāzes izmantošanai abu risināšanas virzienu aprobācijai programmatūrā:

- induktīva analīze, kas parāda pārbaudes kritēriju ietekmi uz nepieciešamajiem izejas parametriem;
- deduktīva analīze, kas parāda izejas parametru ietekmi uz pārbaudāmajiem kritērijiem.

Abos gadījumos ietekme ir funkcionāla sakarība, kas ir nepārtraukta un diferencējama funkcija un tādejādi pielietojama gan matemātiskās analīzes apstrādei

(ekstrēmpunktu meklēšana, ietekmes „jūtīguma” novērtēšana, kritērija izmaiņas ātruma noteikšana u.c.), gan vizuālam novērtējumam ar grafisku attēlojumu.

Atsevišķos gadījumos iespējams ērti konstruēt ietekmes līnijas un no to integrālajām vērtībām – aptvērējepīras.

## SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāta vanšu tiltu nesošo elementu kopdarbības analīzes jauna metodika, kas palīdz atrast racionālus sistēmas izejas parametrus. Definēti novatoriskas „aktīvas” vanšu sistēmas darbības principi. Metodikas pielietojuma iespējas parādītas ar piemēriem. Rezultātu precizitāte pārbaudīta ar tradicionālām aprēķinu metodēm.

- 1) Pierādīts, ka samazinot stinguma sijas inerces momentu, iespējams samazināt arī vanšu šķērsriezuma laukumu, nemainot stinguma sijas lieces momentu epīru. Robežu līdž kurai iespējams samazināt šķērsriezuma parametrus, nosaka pieļaujamie spriegumi atvieglotajā konstrukcijā (nestspējas robežstāvokļa kritērijs) un pārvietojumu ierobežojumi (lietojamības robežstāvokļa kritērijs).
- 2) Mazākie teorētiski iespējamie lieces momenti stinguma sijā no mainīgas kustīgās slodzes ir iegūstami, izveidojot „aktīvu” vanšu sistēmu – sistēmu, kas darbojas kā mehānisms, atkarībā no aktuālajiem vanšu enkurmezglu pārvietojumiem kustīgās slodzes ietekmē, piespriedzot atsevišķas vantis.
- 3) „Aktīvas” vanšu sistēmas spēja samazināt piepūles stinguma sijā ir lielāka konstrukcijām ar mazāku parametra  $\eta$  vērtību, kas parāda pastāvīgo slodžu radīto piepūļu attiecību pret maksimālo piepūli

mezglā, kas iegūta no nelabvēlīgākā mainīgās slodzes novietojuma. Ja ar „aktīvas” vanšu sistēmas palīdzību maksimālās piepūles stinguma sijā samazina par 10%, tad maksimālie stiepes spēki vantīs pieaug par 3%. „Aktīva” vanšu sistēma dod materiāla ekonomiju, kā arī pagarina konstrukcijas darba mūžu, samazinot spriegumu svārstības tilta laiduma konstrukcijā.

- 4) Pierādīts, ka „aktīvās” vanšu sistēmas regulēšanas mehānismam vienlaicīgi jādarbojas tikai tajās vantīs, kas ietver tilta segmentu (paneli), kurā atrodas kustīgā slodze, kā arī centrālā laiduma malējām vantīm. Tas nozīmē, ka malējās vantīs ir aktīvas nepārtraukti, taču pārējās darbojas tikai epizodiski; tādēļ „aktīvas” sistēmas malējām vantīm ieteicams paredzēt lielākas drošības rezerves.
- 5) Konstatēts, ka vanšu stiepes spēki ir proporcionāli elastīgu atspereida balstu pārvietojumiem. Šos lielumus saista atsperes koeficients, kas ir nelineāri atkarīgs no vants stinguma  $E_v F$ . Pārbaudīts, ka tiltam pieļaujamu deformāciju apgabalā šīs atkarības linearizēšanas radītā aprēķinu kļūda izstrādātajā metodikā nepārsniedz 1,3%.
- 6) Racionāla stinguma sijas sadalīšana paneļos un ar to saistītā vanšu enkuru izvietošana ļauj samazināt maksimālos spriegumus laiduma konstrukcijā, vienlaikus vienādojot vanšu stiepes spēkus.