

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte

Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

RIGA TECHNICAL UNIVERSITY

Faculty of Civil Engineering

Institute of Structural Engineering and Reconstruction

Līga GAILE

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorante

PhD student of doctoral program „Construction”

**REŽĢOTU VIEGLU TORŅVEIDA KONSTRUKCIJU
SVĀRSTĪBAS GĀJĒJU DINAMISKO IEDARBJU
REZULTĀTĀ**

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

Dr. sc. ing. zinātniskā grāda iegūšanai Būvzinātnes nozarē,

Būvkonstrukciju apakšnozarē (RTU P-06)

**DYNAMIC RESPONSE OF LIGHT-WEIGHT LATTICE
TOWERS TO HUMAN INDUCED LOADS**

SUMMARY of the Doctoral Thesis

to Obtain the Degree of Dr. sc. ing. in Construction Science,

Structural Engineering (RTU P-06)

Zinātniskais vadītājs / Scientific supervisor:

Dr.sc.ing. Ivars RADIŅŠ

Rīga 2014

UDK 624.97 (043.2)

Ga 165 r

Gaile L. Režgotu vieglu torņveida konstrukciju
svārstības gājēju dinamisko iedarbju iespaidā.
Promocijas darba kopsavilkums. –
R.: RTU, 2014. – 74 lpp.

Gaile L. Dynamic Response of Light-weight
Lattice Towers to Human Induced Loads.
Summary of the doctoral thesis. –
R.: RTU, 2014. – 74 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Būvniecības un
rekonstrukcijas institūta 2013.gada 19.jūnija
lēmumu, protokols Nr. 01/13.

Printed according to RTU Institute of Structural
Engineering and Reconstruction decision protocol
Nr 01/13 dated June 19, 2013.



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

This work has been supported by the European Social Fund within the project
«Support for the implementation of doctoral studies
at Riga Technical University».

ISBN 978-9934-505-04-1

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes, Būvniecības fakultātes, Būvmehānikas katedrā laika posmā no 2011. gada līdz 2013. gadam. Finansālais atbalsts no Eiropas Sociālā fonda (līguma Nr.: 2009/0144/IDP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005).

Oficiālie recenzenti:

Dr.sc.ing. **Darius BAČINSKAS**, Viļņas Gedemina Tehniskās universitātes Tiltu un speciālo konstrukciju katedras asociētais profesors;

Dr.habil.sc.ing. **Jānis VĪBA**, Rīgas Tehniskās universitātes, Teorētiskās mehānikas un materiālu pretestības katedras profesors;

Dr.sc.ing. **Ainārs PAEGLĪTIS**, Rīgas Tehniskās universitātes, Ceļu un tiltu katedras profesors.

Promocijas padomes RTU P-06 sastāvs:

Dr.sc.ing. Diāna BAJĀRE, promocijas padomes sekretāre;

Dr.habil.sc.ing. Jānis BRAUNS;

Dr.sc.ing. Andris ČĀTE;

Dr.sc.ing. Modris DOBELIS;

Dr.habil.sc.ing. Juris JANSONS;

Dr.sc.ing. Jānis KAMINSKIS;

Dr.sc.ing. Juris Rihards NAUDŽUNS;

Dr.sc.ing. Ainārs PAEGLĪTIS;

Dr.sc.ing. Ivars RADIŅŠ;

Dr.habil.sc.ing. Kārlis ROCĒNS, promocijas padomes priekšsēdētājs;

Dr.sc.ing. Dmitrijs SERDJUKS;

Dr.sc.ing. Juris SMIRNOVS.

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.g. 7. februārī plkst. 14:15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu iespējams iepazīties RTU Zinātniskajā bibliotēkā Ķīpsalas ielā 10 un tiešsaistē [http://www.rtu.lv/sadaļa „zinātne”](http://www.rtu.lv/sadaļa_zinatne).

GENERAL INFORMATION

The doctoral thesis was developed at the Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University from 2011 to 2013. It was financially supported by the European Social Fund, Contract No: 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005.

Official reviewers:

Dr.sc.ing. **Darius BACINSKAS**, associate professor of the Department of Bridges and Special Structures in Vinius Gedeminas Technical University;
Dr.habil.sc.ing. **Janis VIBA**, professor of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials in Riga Technical University;
Dr.sc.ing. **Ainars PAEGLITIS**, professor of the Department of Roads and Bridges in Riga Technical University.

Promotion board of RTU P-06:

Dr.sc.ing. Diana BAJARE, secretary;
Dr.habil.sc.ing. Janis BRAUNS;
Dr.sc.ing. Andris CATE;
Dr.sc.ing. Modris DOBELIS;
Dr.habil.sc.ing. Juris JANSONS;
Dr.sc.ing. Janis KAMINSKIS;
Dr.sc.ing. Juris Rihards NAUDZUNS;
Dr.sc.ing. Ainars PAEGLITIS;
Dr.sc.ing. Ivars RADINS;
Dr.habil.sc.ing. Karlis ROCENS, chairman;
Dr.sc.ing. Dmitrijs SERDJUKS;
Dr.sc.ing. Juris SMIRNOVS.

The defence of the thesis will take place in the public meeting on Friday 7 February 2014 at 14:15, in the Assembly Hall at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 16 Azenes Str., Riga, Latvia.

The thesis and the summary of thesis are available at the RTU Scientific Library, 10 Kipsalas Street, Riga and online [http://www.rtu.lv/ section „research”](http://www.rtu.lv/section_research).

KOPSAVILKUMA SATURS / CONTENTS OF SUMMARY

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA	3
GENERAL INFORMATION	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	7
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne	7
Darba mērķis	9
Darba uzdevumi	9
Pētījuma zinātniskā novitāte	10
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums.....	12
Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli.....	12
Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze.....	13
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas	13
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti	14
Promocijas darba sastāvs un apjoms	14
Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs	15
Publikāciju saraksts	16
PROMOCIJAS DARBA SATURS.....	17
1. Literatūras apskats / pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums	17
2. Gājēju soļu radītie laikā mainīgie spēki	19
3. Režgotu torņu svārstības gājēju dinamisko iedarbju rezultātā	25
4. Secinājumi	34
GENERAL REVIEW OF THE THESIS	36
Subject Actuality and Formulation of the Problem	36
Objective of the Study	38
The Tasks of the Thesis.....	38
The Scientific Novelty of the Work	39
Practical Application of the Thesis	40
The Methodology of the Research	41
Theoretical and Methodological Bases of the Research	42

Scope of the Study.....	42
Results Presented for the Defense.....	43
Structure and Volume of the Doctoral Thesis.....	43
The Approbation of the Results - List of relevant International Conferences	44
List of the Authors Scientific Publications on the Topic of the Thesis	45
SUBSTANCE OF THE DOCTORAL THESIS	46
1. Literature review	46
2. Research on footfall induced forces	48
3. Research on human induced vibrations of lattice light-weight towers ..	54
4. Conclusions.....	63
PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES /	65
LIST OF REFERENCES OF THE THESIS.....	65
Par promocijas darba autori	73
About the Author.....	73

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Cilvēku kustības rezultātā izraisītu vieglu un lokanu būvju svārstības ir sevišķi aktuāla pētījumu tēma pasaulē jau vairāk nekā 10 gadus. Daudzu pētnieku interesi pievēršties tai piesaistīja vairāk nekā 18 milj. angļu mārciņu vērtā Londonas gājēju tilta iepriekš neparedzētās sāniskās svārstības tā atklāšanas dienā 2000. gadā. Cilvēku un konstrukcijas mijiedarbības pētījumu aktualitāti un sarežģītību arī apliecina vēl aizvien notiekošās pētnieku diskusijas starptautiskās zinātniskās konferencēs un forumos par šo tematu.

Zināmākās konstrukcijas, kuru svārstības var izraisīt cilvēku aktivitāte (iešana, lēkšana, skriešana, vandālisms un citi) ir gājēju tilti, lokanas kāpnes, tribīnes un pārsegumi. Gājēju tiltu gadījumā svārstības pārsvarā tiek ierosinātas šķērsvirzienā un tās pamatā izsauc gājēju slodzes šķērsvirziena komponente. Gājēju tiltu svārstības ir samērā labi izpētītas, par ko liecina izstrādātās projektēšanas rekomendācijas gājēju komforta nodrošināšanai.

Latvijā biežāk par lokaniem gājēju tiltiem sastopamas citas pret gājēju slodzi jutīgas būves – skatu torņi, kas cilvēku – konstrukcijas dinamiskās mijiedarbības kontekstā nav pētīti. Skatu torņiem atšķirībā no gājēju tiltiem būtiskas ir gan gājēju slodzes šķērsvirziena, gan garenvirziena komponentes.



Att. 1. Skatu torņu izvietojums Latvijā

Vēsturiski brīvi stāvoši skatu torņi galvenokārt bija paredzēti apkārtnes pārraudzīšanai armijas vajadzībām. Par tūrisma simbolu tie kļuva, iespējams, 1889. gadā, kad Vispasaules izstādes ietvaros Parīzē tika atklāts Eifeļa tornis.

Pilsētās skatu torņi parasti ir augsti un kalpo kā arhitektonisks akcents, savukārt lauku apvidos skatu torņi ir veidoti tā, lai apmeklētājiem ļautu brīvi pārlūkot apkārtni, un to izskatu pārsvarā nosaka ekonomiski apsvērumi.

Latvijā skatu torņi pārsvarā atrodas Latgalē un Kurzemē. Autore izpētīto publiski pieejamo skatu torņu ar vieglu režģotu konstrukciju atrašanās vietas ir parādītas attēlā 1. Jāatzīmē, ka 18 no 19 izpētītajiem torņiem ir pakļauti būtiskai gājēju slodzes ietekmei, kas zināmai daļai apmeklētāju izraisa diskomforta sajūtu.

Gandrīz pusi no šiem skatu torņiem pārvalda valsts akciju sabiedrība “Latvijas Valsts meži”, kura pastāvīgi rūpējas par vides infrastruktūras objektu attīstīšanu. Kā piemēru var minēt nesen (2012. gada oktobrī) atklāto 28,5 m augsto Ančupānu koka skatu torni Rēzeknē. Lai gan skatu torņu būvniecība ir diezgan dārga, tas ir lielisks veids, kā palielināt ne pārāk populāru apvidu pievilcību tūristu acīs.

Daži no apsekotajiem torņiem ir ar jauktu tipa karkasu, piemēram, koka kolonnas, sijas un apšuvums, bet no tērauda stieņiem veidota šķērsvirziena stinguma sistēma. Tomēr lielākoties skatu torņus pēc konstrukcijas veida iespējams iedalīt koka (70% apskatīto torņu) un tērauda torņos. Tipveida tērauda un koka skatu torņi ir parādīti attēlā 2.



Att. 2. Tipveida skatu torņi; a) Tērauda skatu tornis (Kalsnava);
b) koka skatu tornis Latgalē (Priedaine)

Lielākajai daļai no torņiem Latvijā ir pievienoti lietošanas noteikumi, kas ierobežo apmeklētāju skaitu no 5 līdz 10 cilvēkiem. Tomēr šādiem

ierobežojumiem nav zinātniska pamatojuma. Koka skatu torņu būvniecība pilnībā tiek balstīta iepriekšējā būvniecības pieredzē un nav pamatota ar aprēķiniem.

Jūrmalā, Dzintaros 2010. gadā tika atklāts lokans, ekscentriskas konfigurācijas tērauda skatu tornis. Lielākā daļa Dzintaru torņa apmeklētāji sajūt svārstības, kas izraisa diskomfortu atrodoties uz skatu torņa augšējās platformas. Šīs būves samērā lielas amplitūdas svārstības, kas netika paredzētas torņa projektēšanas stadijā, atklāj izpratnes trūkumu par gājēju ierosinātu svārstību iespaida ievērtēšanu skatu torņu projektēšanas procesā. Šobrīd būvnormatīvos nav pieejami norādījumi vai rekomendācijas projektēšanai, kas attiecas uz lokanu torņu dinamiskās reakcijas paredzēšanu, cilvēku radīto dinamisko iedarbju rezultātā. Ar terminu „dinamiskā reakcija” (*dynamic response*) šajā darbā tiek apzīmēta maksimālā konstrukcijas svārstību amplitūda pielikto dinamisko iedarbju rezultātā (attiecīgi pārvietojuma vai paātrinājuma amplitūda). Jūrmalas torņa gadījums parāda, ka apvidos ar zemu seismisko aktivitāti un salīdzinoši nelielām vēja slodzēm, cilvēku radītās dinamiskās slodzes ir izšķirošs faktors lokanu un vieglu skatu torņu projektēšanā, nodrošinot ekspluatējamības (komforta) kritēriju izpildi.

Lai nākotnē varētu veidot estētiskas un ekonomiski pamatotas un apmeklētājiem komfortablas vieglas konstrukcijas, ir nepieciešami pētījumi un padziļināta izpratne par cilvēku radītajām dinamiskajām iedarbēm un to pareizu piemērošanu skatu torņu konstrukciju projektēšanā.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir eksperimentāli noteikt un aproksimēt laikā mainīgas gājēju slodzes, lai izveidotu pamatotu vieglu konstrukciju aprēķiniem piemērotu, laikā mainīgu gājēju slodzi, izdalot slodzes vertikālo, garenvirziena un šķērsvirziena komponenti, kā arī izstrādāt aprēķina metodi, ar kuru iespējams noteikt šo slodžu maksimālo iespaidu uz vieglu režģotu torņu svārstību paātrinājuma un pārvietojumu amplitūdām.

Darba uzdevumi

Lai sasniegtu iepriekš minēto pētījuma mērķi, ir izvirzīti sekojoši uzdevumi, kas iedalīti divās grupās:

- 1) Uzdevumi, kas saistīti ar cilvēka pārvietošanās rezultātā radītu laikā mainīgu slodžu eksperimentālu noteikšanu un to aproksimāciju:

- Izstrādāt metodi eksperimentālai cilvēka soļu radīto spēku noteikšanai, novēršot ārējo faktoru būtisku ietekmi uz eksperimenta dalībnieku dabisko kustību eksperimenta laikā;
 - Izstrādāt eksperimentālo datu apstrādes metodi vidējotas gājēju slodzes izmaiņas laikā noteikšanai (*mean walking force history*) un analītiskas funkcijas iegūšanai tās aprakstam, tālākai izmantošanai analītiskos aprēķinos skatu torņu dinamiskās reakcijas (*dynamic response*) noteikšanai cilvēku radīto iedarbju rezultātā.
 - Uz iepriekš izstrādātās teorētiskās bāzes pamata iegūt soļu radītās slodzes dinamiskās iedarbes koeficientus (*dynamic load factors (DLF)*) un atbilstošās fāzu nobīdes starp kustību raksturojošām komponentēm kāpšanai pa tipveida kāpnēm. Salīdzināt iegūtos datus ar pieejamajiem citu pētnieku datiem izstrādātās metodes pārbaudei.
- 2) Uzdevumi, kas saistīti ar režģotu skatu torņu konstrukciju slogošanu ar iepriekš noteiktajām laikā mainīgajām gājēju slodzēm un to iespaida noteikšanu uz torņu svārstību pātrinājuma amplitūdām:
- Eksperimentāli iegūt dinamiskos parametrus lielākajai daļai publiski pieejamo Latvijas skatu torņu, kā arī eksperimentāli noteikt un veikt analīzi par gājēju slodžu ierosinātām svārstībām 19 publiski pieejamiem skatu torņiem Latvijā. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem izstrādāt kritērijus, kādām režģotām torņveida konstrukcijām ir būtiski cilvēku kustības radītie efekti un novērtēt dažādu parametru (konstrukcijas svārstību rīšana, attiecība starp soļošanas tempu un konstrukcijas pašsvārstību frekvenci, konstrukcijas stingums, atsevišķu soļošanas harmoniku iespaids, apmeklētāju skaits, svārstību forma) ietekmi uz skatu torņu svārstību pātrinājumu amplitūdu vērtībām.
 - Pamatojoties uz eksperimentālās izpētes rezultātiem, izstrādāt aprēķinu modeli režģotu skatu torņu svārstību maksimālo pātrinājuma vērtību noteikšanai no apmeklētāju slodzēm. Kā arī izstrādāt ierobežojošos kritērijus, lai skatu torņu apmeklētājiem nodrošinātu pieņemamu komforta līmeni atrodoties uz skatu torņa platformas.

Pētījuma zinātniskā novītāte

Eksperimentāli un teorētiski pierādīts, ka viegli režģoti skatu torņi, kuru pamatfrekvence zemāka par 3,3 Hz cilvēku kustības radīto dinamisko iedarbju rezultātā pakļauti riskam tikt iesvārstīti ar svārstību pātrinājuma amplitūdu, kas nenodrošina torņa apmeklētājiem pieņemamu komforta līmeni.

Pētījuma zinātniskās novitātes tāpat kā izvirzītie uzdevumi var tikt iedalīti divās grupās. Pirmā grupa saistīta ar cilvēka pārvietošanās rezultātā radītu laikā mainīgu spēku eksperimentālu noteikšanu un to aproksimāciju:

- Izstrādāta jauna metode no inversās dinamikas jomas, kas ļauj eksperimentāli noteikt cilvēka kustības rezultātā radītos dinamiskos spēkus, izmantojot kompakts paātrinājuma mērītājus, kas izvietoti tuvu cilvēka smaguma centram. Metode piemērota attiecīgo civilās būvniecības uzdevumu risināšanai plašā apstākļu diapazonā. Salīdzinājumā ar tradicionālajām tiešo mērījumu metodēm, nepieciešamie mērinstrumenti ir salīdzinoši vienkārši, pastāv iespēja iegūt datus par ilgstošāku slodzes iedarbību, un eksperimenta apstākļi būtiski neietekmē eksperimentos iesaistītās personas spēju kustēties brīvi un dabiski. Pēdējais ir būtisks trūkums tradicionālajām mērījumu metodēm.
- Pētījumā ir piedāvāta jauna pieeja dinamiskās iedarbes koeficientu (DLF) iegūšanai no vidējotas gājēju slodzes izmaiņas laikā, kas balstīta uz eksperimentāli iegūtiem rezultātiem. Šāda pieeja ļauj saglabāt tādus svarīgus parametrus kā fāzu nobīdes starp kustību raksturojošām komponentēm, kas nepieciešamas, lai varētu izstrādāt vidējotas gājēju slodzes izmaiņas laikā analītisko izteiksmi. Tā savukārt var tikt lietota apskatāmās konstrukcijas analītiskos aprēķinos.
- Pirmo reizi ir iegūti vidējie dinamiskās iedarbes koeficienti (DLF) un atbilstošās fāzu nobīdes starp kustību raksturojošām komponentēm, kā arī vidējoto DLF atkarība no augšup vai lejup kāpjošas personas soļošanas tempa gājēja slodzes garenvirziena un šķērsvirziena komponentēm.

Otrā zinātnisko novitāšu grupa saistīta ar režgotu skatu torņu konstrukciju slogošanu ar iepriekš noteiktajām laikā mainīgajām slodzēm un to iespaida noteikšanu uz torņu svārstību amplitūdu:

- Pētījuma ietvaros pirmo reizi izstrādāta aprēķinu metodoloģija vieglas režgotas konstrukcijas torņu maksimālās svārstību amplitūdas noteikšanai apmeklētāju pārvietošanās iespaidā. Metodoloģijas pamatā ir pētījumi par konstrukciju, kam būtu jāņem vērā cilvēka radītās dinamiskās iedarbes, raksturojošiem parametriem, par būtiskajām gājēju slodzēm un to novietojumu, analītisks risinājums sākotnējo projekta aprēķinu veikšanai, kā arī svārstības ierobežojošie kritēriji apmeklētāju labsajūtas uzlabošanai.
- Eksperimentālu pētījumu rezultātā pirmo reizi iegūts dinamisko parametru datu kopums (rimšanas koeficienti, konstrukcijas pamatfrekvences un pašsvārstību frekvences) lielākajai daļai Latvijā publiski pieejamo režgotas konstrukcijas skatu torņu.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Sasniedzot promocijas darbā izvirzīto mērķi, galvenais praktiskais ieguvums ir piedāvātā torņu svārstību maksimālo paātrinājumu visbiežāk sastopamo cilvēka radīto dinamisko iedarbju ietekmē, noteikšanas metodoloģija algoritma veidā. Izstrādātais algoritms noderīgs praktizējošiem būvinžinieriem, kas nodarbojas ar publiski pieejamu skatu torņu projektēšanu, jo pašlaik trūkst jebkādas citas projektēšanā izmantojamas informācijas par ekspluatējamības kritēriju izpildi.

Piedāvātās aprēķina metodes dod iespēju pamatot, koriģēt un varbūt pat atcelt noteikumus, kas ierobežo vienlaicīgu apmeklētāju skaitu lielākajā daļā Latvijas publisko skatu torņu.

Šajā pētījumā iegūtie vidējie dinamisko iedarbju koeficienti (DLF), atbilstošās fāzu nobīdes starp kustību raksturojošām komponentēm un to atkarība no augšup vai lejup kāpjošas personas soļošanas tempa dinamiskās iedarbes ir informācija, kas papildina starptautiskā standarta ISO 10137:2007 tabulu A.4, kurā ir sniegti piemēri projektēšanas parametriem saistībā ar vienu pa kāpnēm augšup vai lejup kāpjošu personu. Šobrīd standartā informācija ir dota tikai par vertikālā virziena pirmajām divām harmonikām.

Pētījuma ietvaros izstrādāta eksperimentālo datu vizualizācijas datorprogramma, kas var tikt sekmīgi pielietota kā ērts instruments konstrukcijas svārstību līmeņa novērtēšanai dinamiskās testēšanas laikā.

Līdz ar to promocijas darba izstrādnes kalpo par pamatu, kas nepieciešams, lai turpmāk varētu būvēt ekonomiskus un estētiskus vieglas režģotas konstrukcijas publiskos skatu torņus, kas nodrošina arī apmeklētāju komforta prasības.

Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli

Promocijas darbā izstrādātās metodes no cilvēka pārvietošanās dinamisko slodžu iegūšanai pamatā ir otrais Ņūtona likums un pētījumi biomehānikas nozarē par cilvēka kustības kinemātiku. Gājēju slodžu gadījuma rakstura ievērtēšanai izstrādāts algoritms komerciālajā programmā “Mathcad”, izmantojot tajā iestrādāto nejaušu skaitļu ģeneratoru.

Eksperimentālo datu apstrāde, frekvenču spektru iegūšanai, pamatā veikta ar komerciālo programmatūru ME'scopeVES (versija 5.1.2010.1215). Eksperimentālo datu vizualizācijai konstrukcijas svārstību līmeņa novērtēšanai dinamiskās testēšanas laikā, izmantota speciāli izstrādāta programma Adobe Air vidē.

Režģoto skatu torņu analītiskā aprēķinu modeļa, kas izmantots teorētiskos pētījumos, pamatā ir Eilera – Bernulli prizmatiskas konsoles diferenciālvienādojums. Skaitlisko eksperimentu veikšanai izmantota komerciāla galīgo elementu programma STRAP (versija 12.5).

Eksperimentālo svārstību paātrinājumu noteikšanai izmantoti pieci viegli (55 g) 3-asu USB paātrinājuma mērītāji, modelis X6-1A (ražotājs - Gulf Coast Data Concepts, LLC).

Pētījumu teorētiskā un metodoloģiskā bāze

Promocijas darbā pētījumi, izstrādātās metodes un aprēķinu modeļi balstīti uz šādām inženierzinātņu nozarēm:

- konstrukciju dinamika;
- būvmehānika;
- būvkonstrukcijas;
- modālā un eksperimentālā modālā analīze;
- varbūtību teorija;
- biomehānika;
- signālu analīze.

Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas

Izstrādātā aprēķinu metode vieglu režģotu torņu svārstību paātrinājuma maksimālo amplitūdu noteikšanai gājēju dinamisko slodžu iespaidā ir spēkā izpildoties šādiem nosacījumiem:

- 1) maksimālie spriegumi torņa elementos nepārsniedz pieļaujamos saskaņā ar nespējas robežstāvokļa prasībām;
- 2) maksimālie pārvietojumi no atbilstošās vēja iedarbes nepārsniedz ekspluatējamības robežstāvokļa prasības;

Aprēķinu metodika izstrādāta balstoties uz eksperimentiem, kas veikti koka un tērauda skatu torņiem. Izstrādāto metodiku ir racionāli izmantot sekojošā apgabalā:

- torņa augstums L virs zemes līmeņa: $15m \leq L \leq 50m$;
- torņa stingums EI un torņa masa uz tekošo metru m ir:

$$EI \leq 2 \cdot 10^6 L^{2.968} ;$$

$$m \leq 206241 \cdot L^{-1.032} ;$$

(ierobežojumi, ar kuriem darbā tiek saprasti termini „lokans” un „vieglis”);

- torņa zemākā pašsvārstību frekvence f : $f \leq 3.3Hz$.

Metode cilvēka kustības rezultātā radītās dinamiskās iedarbes noteikšanai ir derīga, ja pārvietošanās virsma ir ar ievērojami lielāku zemāko pašsvārstības frekvenci kā aktivitātes raksturojošā frekvence. Kā arī, ja aktivitāte (iešana, skriešana, lēkšana vai ķermeņa šūpošanās) notiek ar gandrīz nemainīgu frekvenci vai konstantu ātrumu un ievērojot taisnvirziena trajektoriju.

Noteiktās vidējoto dinamiskās iedarbes koeficientu (DLF) un tiem atbilstošo fāzu nobīžu starp kustību raksturojošām komponentēm skaitliskās vērtības vienai personai kāpjot pa kāpnēm derīgas kāpnēm, kuru slīpums b ir šādās robežās: $24^\circ \leq \beta \leq 42^\circ$ un soļu frekvence diapazonā $1\text{Hz} \leq f_p \leq 2.3\text{Hz}$.

Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti

1. Metode cilvēka kustības rezultātā radītās dinamiskās iedarbes noteikšanai (izdalot slodzes vertikālo, garenvirziena un šķērsvirziena komponenti), kas balstīta uz indivīda smaguma centra (COG) kustības kinemātiku, izmantojot akselerometrijas tehnoloģiju kustības mērīšanai.
2. Eksperimentālo datu apstrādes metode vidējotas gājēju slodzes izmaiņas laikā analītiskās izteiksmes iegūšanai.
3. Vidējoto dinamiskās iedarbes koeficientu (DLF) un tiem atbilstošo fāzu nobīžu starp kustību raksturojošām komponentēm skaitliskās vērtības vienai personai ar dažādu soļu frekvenci pārvietojoties augšup vai lejup pa tipveida kāpnēm.
4. Metodoloģija maksimālās svārstību paātrinājuma amplitūdas noteikšanai lokaniem režģotiem torņiem ar dažādiem dinamiskajiem un ģeometriskajiem parametriem no cilvēku pārvietošanās izraisītām gadījuma rakstura dinamiskām iedarbēm.
5. Rekomendācijas torņu svārstību pieļaujamajām paātrinājumu vērtībām, kas nodrošina apmeklētājiem pieņemamu komforta līmeni pie dažādām torņu svārstību frekvencēm.

Promocijas darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no anotācijas, ievada, trim galvenajām nodaļām, kas sadalītas apakšnodaļās, secinājumiem un literatūras saraksta. Pirmajā nodaļā ir veikts literatūras apskats uz kā pamata formulēts disertācijas mērķis un izvirzīti uzdevumi tā sasniegšanai, 2. un 3. nodaļā ir izklāstīts pētījuma uzdevumu izpildes un mērķa sasniegšanas process.

Darbs satur 135 lappuses, 82 attēlus, 28 tabulas un literatūras sarakstu ar 136 nosaukumiem. Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā.

Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs

1. RASD 2013 11th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, Italy, Piza, 1st – 3rd July, 2013 (Gaile L., Rādiņš I. Lattice Tower Dynamic Performance under Human Induced Loading).
2. The 9th International scientific conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, June 20-22, 2013 (Gaile L. Analysis of Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia).
3. The International Scientific Conference „Civil Engineering’13” of Latvia University of Agriculture. Jelgava, 16-17 May, 2013 (Gaile L., Rādiņš I. The Footfall Induced Forces on Stairs).
4. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni, Riga, Latvia, 11-12 October, 2012 (Gaile. L., Rādiņš. I. Dynamic Loading and Response of Observation Towers and Gaile. L. Analysis of Dynamic Parameters of Timber and Steel Observation Towers).
5. 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012/USD2012). Belgium, Leuven, 17-19 September, 2012 (Gaile L., Rādiņš I. Steel Lattice Sightseeing Tower’s Horizontal Vibrations Induced by Human Movement).
6. 19th International Congress on Sound and Vibration Proceedings of Recent Developments in Acoustics, Noise and Vibration (ICSV19). Lithuania, Vilnius, 8-12 July, 2012 (Gaile L., Rādiņš I. Eccentric Lattice Tower Response to Human Induced Dynamic Loads).
7. International Conference on Civil and Construction (ICSCE 2012). Sweden, Stockholm, 11-12 July, 2012 (Gaile L., Rādiņš I. Human Induced Dynamic Loading on Stairs).
8. XVII International Conference on Mechanics of Composite Materials, 2012, May 28 - June 1, Jurmala (Gaile L., Rādiņš I. Assessment of the Fatigue Life of a Tower by Using a Real-Time Loading History).
9. Rīgas Tehniskās universitātes 52. Starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, 2011. gada 13.-16. oktobris. (L. Gaile, I. Rādiņš. Cilvēku izraisīto svārstību ietekme uz konsoles veida konstrukcijām).
10. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress "Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte", Sekcija "Tehniskās Zinātnes". (Gaile L., Rādiņš I. Ekscentriskas konstrukcijas darbība dinamisko slodžu ietekmē).
11. The International Scientific Conference „Civil Engineering’11” of Latvia University of Agriculture, Jelgava, May 12-13, 2011 (Gaile L., Rādiņš I. Time Depending Service Load Influence on Steel Tower Vibrations).

12. The 8th International scientific conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, June 20-22, 2011 (Gaile L., Radinsh I. Dynamic Response of Tower Structures).

Publikāciju saraksts

1. Gaile L., Radinsh I. Lattice Tower Dynamic Response Calculation to Human Induced Loads: Case Study // 54th International Conference of Riga Technical University: „Innovative Materials, Structures and Technologies”, Riga, Latvia, November 8, 2013, (*akceptēts publicēšanai*).
2. Gaile L., Radinsh I. Lattice Tower Dynamic Performance under Human Induced Loading // RASD 2013 11th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, Italy, Piza, 1st – 3rd July, 2013, pp.1-15.
3. Gaile L. Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Latvia, Rezekne, 20-22 June, 2013, pp. 57-62.
4. Gaile L., Radinsh I. The Footfall Induced Forces on Stairs // „Civil Engineering'13”: 4th International Scientific Conference Proceedings, Part I, Latvija, Jelgava, 16-17 May, 2013, pp. 60-68.
5. Gaile L., Radiņš I. Steel Lattice Sightseeing Tower's Horizontal Vibrations Induced by Human Movement // 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012/USD2012), (CD-ROM), Belgium, Leuven, 17-19 September, 2012, pp. 1211-1221, (*indeksēts Thomson Reuters Web of Science datu bāzē*).
6. Gaile L., Radiņš I. Eccentric Lattice Tower Response to Human Induced Dynamic Loads // 19th International Congress on Sound and Vibration Proceedings of Recent Developments in Acoustics, Noise and Vibration (ICSV19) Lithuania, Vilnius, 8-12 July, 2012, pp. 560-567, (*indeksēts SCOPUS datu bāzē*).
7. Gaile L., Radiņš I. Human Induced Dynamic Loading on Stairs // Proceedings of International Conference on Civil and Construction (ICSCE 2012). Sweden, Stockholm, 11-12 July, 2012. Issue 67, pp. 626-632.
8. Gaile L., Radiņš I. Time Depending Service Load Influence on Steel Tower Vibrations // „Civil Engineering'11”: 3rd International Scientific Conference Proceedings, Latvija, Jelgava, 12-13 May, 2011, pp. 144-149m (*indeksēts SCOPUS datu bāzē*).
9. Gaile L., Radiņš I. Dynamic Response of Tower Structures // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Latvia, Rezekne, 20-22 Jun, 2011, pp. 85-91.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba ievada daļā ir formulēta pētījuma problēma, izvirzītais mērķis un galvenie uzdevumi tā sasniegšanai, kā arī izcelta pētījuma zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme, definētas pētījuma robežas, pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze.

1. Literatūras apskats / pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums

Literatūras apskats, kas ir pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums, sastāv no divām apakšnodalām, kurās analizētas šobrīd aktuālās pieejas cilvēka radītu dinamisko slodžu eksperimentālai noteikšanai un teorētiskai modelēšanai, to pielietojums konstrukciju aprēķinos, kā arī svārstību amplitūdu noteikšana konstrukcijām, kas var tikt pakļautas būtiskām cilvēku aktivitāšu radītām dinamiskām iedarbēm un esošo ekspluatējamības kritēriju analīze saistībā ar pieļaujamo konstrukciju vibrāciju līmeni.

Viegli gājēju tilti [131], grīdas ar mazu pašsvaru [41], tribīnes [24, 35], lokanas kāpnes [72] ir konstrukcijas, kurās galvenais vibrāciju cēlonis ir cilvēku aktivitātes. Arvien izplatītākās ar svārstībām saistītas problēmas lokanām un vieglām konstrukcijām ar zemu rimšanas koeficientu parāda, ka mūsdienās vairs nav pieņemami projektu izstrādāt, balstoties tikai uz statistiskajām slodzēm. Tāpat kā tādas labi zināmas konstrukcijas kā liela laiduma pārsegumi un kāpnes vai gājēju tilti, lokani režģoti skatu torņi pārstāv konstrukciju veidu, kas var tikt pakļauti būtiskām cilvēku radītām svārstībām. Skatu torņu būvkonstrukciju projektēšana ir lielākoties balstīta uz iepriekšējo būvniecības pieredzi, jo šobrīd nav pieejamas nekādas vadlīnijas par to, kā projektā papildus vēja vai seismiskajām slodzēm ievērtēt arī citas dinamiskās iedarbes. Pēdējā laikā lielāku nozīmi iegūst projekta arhitektoniskais aspekts un, veicot atkāpes no tradicionālās būvniecības un projektēšanas pieredzes, ir nepieciešama dziļāka izpratne par torņu dinamisko reakciju (pārvietojumiem un paātrinājumiem) cilvēka radīto dinamisko iedarbju rezultātā. Tādējādi būtu iespējams savlaicīgi ierobežot svārstības un nodrošināt šādu konstrukciju apmeklētājiem pieņemamu komforta līmeni. Lai arī ir zināmi gadījumi, kad publiski pieejamu, vieglas konstrukcijas skatu torņu svārstības ekspluatācijas laikā rada nepatīkamas sajūtas tā apmeklētājiem [47], trūkst kritēriju šīs problēmas novēršanai projektēšanas stadijā. Tas ir īpaši aktuāli tādos reģionos kā Latvija, kur pārsvarā ir līdzens reljefs un kur vēja un seismiskās slodzes ir salīdzinoši nelielas.

Lai izstrādātu metodes skatu torņu maksimālo svārstību amplitūdu aprēķināšanai, šajā apakšnodalā tiek apskatīti pastāvošo metodoloģiju

pamatprincipi, kas tiek piemēroti citām konstrukcijām — tiltiem un lokanām grīdām, cilvēku radīto dinamisko iedarbju konstrukciju vibrāciju līmeņa noteikšanai [20, 37, 88, 89, 116, 130, 131].

Šobrīd pastāv dažādi ekspluatējamības kritēriji, kam jānodrošina konstrukcijas un tās elementu piemērotība paredzētajam nolūkam. Starptautiskajos standartos norādītās pieļaujamās šķērsvirziena paātrinājuma robežvērtības ir tieši saistītas ar konstrukciju lietotāju labsajūtu [54, 67]. Pārsvārā šīs vērtības ir noteiktas dzīvojamām vai biroju augstceltnēm, kā arī tiltiem. Autores rīcībā nav informācijas par to, ka būtu izstrādāti un pieejami kādi ieteikumi par skatu torņiem šajā aspektā.

Promocijas darba literatūras apskatā izvērtēts pašreizējais stāvoklis cilvēka radītu dinamisko iedarbju noteikšanā [22, 95, 116, 131]. Tiek analizētas izmantotās testēšanas metodes [68, 72, 95, 96]. Visbiežāk izmantotā pieeja, kas balstīta uz pilnībā atkārtojamo soļu Furjē sadalījumu, paredz attēlot gājēju slodzi laika diapazonā kā Furjē sinusoidālo komponentu summu. Šajā gadījumā metodes pamatā ir $i^{tās}$ harmonikas Furjē koeficients, kas bieži tiek saukts par dinamiskās iedarbes koeficientu (DLF_i). Gājēju slodzes simulēšanai piemērotāki ir varbūtiskie spēku modeļi, jo tas ir no daudziem parametriem atkarīgs gadījuma rakstura šaura spektra process. Tomēr no projektēšanas viedokļa ērtāk būtu izmantot deterministisku spēku modeli, kurā ņemtas vērā gājēju slodzes novirzes no periodiskā rakstura.

Analizējot eksperimentālās metodes, gājēju balsta reakciju spēka (GRF) noteikšanai tiek secināts, ka tā sauktajām inversajām dinamiskajām metodēm piemīt liels potenciāls pielietojumam būvniecības nozarē, lai noteiktu uz konstrukciju darbojošos nepārtrauktos cilvēka radītos dinamiskos spēkus plašā apstākļu diapazonā.

Lai gan pēdējā laikā vairākos detalizētos literatūras apskatos un jaunākās projektēšanas vadlīnijās ir atspoguļota pētnieku interese par gājēju slodžu eksperimentālu noteikšanu un modelēšanu, lielākā daļa šo pētījumu attiecas tikai uz gājēju iedarbēm, pārvietojoties pa horizontālām virsmām. Joprojām ir ļoti maz pētījumu par gājēju slodzēm, pārvietojoties pa kāpnēm, kas būtu piemēroti būvniecības nozarei. Pamatā šādi pētījumi veikti biomehānikas nozarē, kur lielākā interese ir, nevis nepārtrauktas slodzes atrašanās, bet gan atsevišķās vērtībās, ar kuru palīdzību tiek raksturota normāla cilvēka gaita.

Esošos pētījumos būtiskas atšķirības starp aprēķinātajām un eksperimentāli izmērītām lokanu kāpņu dinamiskām reakcijām (paātrinājumiem) no gājēju iedarbēm apstiprina, ka esošie slodžu modeļi joprojām ir nepilnīgi. Autores rīcībā nav informācijas par to, ka iepriekš kādos citos pētījumos būtu noteiktas augšup un lejup kāpjošas personas radītās dinamiskās iedarbes uz kāpnēm

garenvirziena un šķērsvirziena komponentes. Taču tieši šīs komponentes ir galvenās cilvēka radītās dinamiskās iedarbes, kas nepieciešamas skatu torņu dinamiskās reakcijas aprēķiniem.

Balstoties uz literatūras apskatu, formulēts promocijas darba mērķis, kā arī ir izvirzīti uzdevumi šī mērķa sasniegšanai. Izvirzītie uzdevumi ir iedalāmi divās grupās, no kurām pirmie ir saistīti ar cilvēka pārvietošanās rezultātā radītu laikā mainīgu spēku eksperimentālu noteikšanu un to aproksimāciju, bet otrie ar iepriekš noteikto laikā mainīgo spēku pielikšanu režģotām skatu torņu konstrukcijām un to iespaida noteikšanu uz torņu svārstību amplitūdu.

2. Gājēju soļu radītie laikā mainīgie spēki

Izanalizējot šobrīd plaši pielietotās eksperimentālās metodes cilvēka kustības rezultātā radušos dinamisko spēku noteikšanai, kopumā izkristalizējas trīs galvenie trūkumi: mērinstrumentu un to izvietojumu būtiskā ietekme uz cilvēku kustēties brīvi eksperimenta laikā [17], pārsvarā eksperimentālie mērījumi iespējami tikai laboratorijas apstākļos un sarežģīta paša eksperimenta uzbūve. Tāpēc darba eksperimentālā pētījuma ietvaros izstrādāta metode, ar kuru paredzēts iegūt gājēju slodzes izmaiņas laikā, izmantojot cilvēka smaguma centra (COG) kustības kinemātiku, vienlaicīgi mazinot iepriekš minēto trūkumu ietekmi. Piemēram, vertikālās gājēju slodzes funkciju var iegūt no vienkārša dinamiskā līdzsvara, kas balstīts uz otro Ņūtona likumu (1).

$$F(t) = Mg + Ma(t). \quad (1)$$

Bet horizontālās gājēju slodzes funkciju iegūst izmantojot izteiksmi (2):

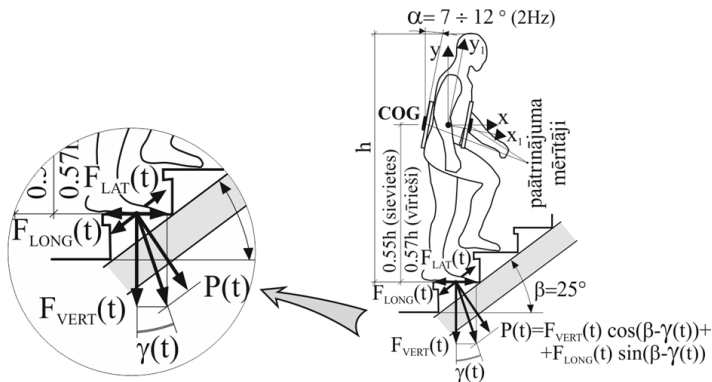
$$F(t) = Ma(t). \quad (2)$$

kur

M ir personas ķermeņa masa,
 g – gravitācijas konstante,
 a – COG paātrinājums.

Ticamu COG paātrinājuma datu $a(t)$ iegūšanai tika izmantota progresīvo inverso dinamisko metožu kategorijai piederīgā akselerometrijas tehnoloģija. Eksperimenta konfigurācija parādīta 3. attēlā.

Eksperimenta laikā tika izmērīta un ierakstīta 18 personu (jaukta vīriešu un sieviešu grupa) smaguma centru paātrinājuma izmaiņa laikā, kāpjot augšup un lejup pa tipveida kāpnēm. Testa dalībnieki kāpšanu atkārtoja vairākas reizes ar dažādiem brīvi izvēlētiem ātrumiem.



Att. 3. Eksperimenta konfigurācija

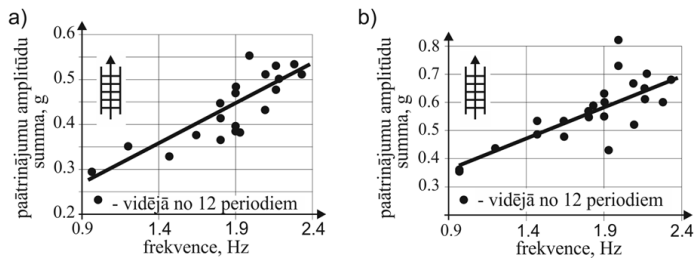
Uz šo datu pamata tika izstrādāta jauna eksperimentālo datu apstrādes metode, kas ļauj iegūt vidējotās gājēju slodzes izmaiņu laikā (*mean walking force history*) un iegūt analītisko funkciju tās aprakstam, ko iespējams tālāk izmantot analītiskos aprēķinos, skatu torņu dinamiskās reakcijas (*dynamic response*) noteikšanai cilvēku radīto iedarbju rezultātā.

Atšķirībā no tradicionālās pieejas, kad sakarības starp soļošanas tempu un slodzes amplitūdām tiek balstītas uz vidējo soļošanas harmonikas DLF amplitūdu, šī metode piedāvā atrast vidējoto nepārtrauktās gājēju slodzes izmaiņu laikā (*mean continuous walking force history*), ņemot vērā arī atkārtoto soļu ne periodiskumu. Tādā veidā netiek zaudēta informācija par fāzu nobīdēm starp kustību raksturojošām komponentēm (harmonikām) — šis parametrs ir nepieciešams, lai iegūtu uz Furjē rindām balstītu analītisku funkciju. Metodes būtība soli pa solim aprakstīta un ilustrēta 1. tabulā.

Lai gan līdzīgu eksperimenta konfigurāciju var izmantot arī citu cilvēka darbību radīto dinamisko slodzi noteikšanai, šajā gadījumā īpaša uzmanība tika pievērsta tieši kustībai augšup un lejup pa kāpnēm, jo tas ir viens no galvenajiem vieglu režģotu skatu torņu dinamisko sloģojumu veidiem. Tāpēc darba 2.3. *apakšnodaļā* aprakstīti ar to saistītie rezultāti, kas iegūti ar iepriekš izstrādātajām metodēm. Tajā skaitā atrasts vidējotais frekvenču spektrs gājējam, pārvietojoties augšup (ar 2Hz) un lejup pa kāpnēm (ar 2.15Hz) priekš visām trim spēka komponentēm, kā arī noteiktas atbilstošās fāzu nobīdes starp kustību raksturojošām komponentēm - harmonikām.

Lai noteiktu sakarības starp gājēju slodzes amplitūdām un soļu frekvencēm, ir ieteicams aplūkot nevis atsevišķās, konkrētai frekvencei atbilstošās indivīda DLF_i vērtības, bet gan izmantot vidējo izmaiņu starp maksimālajām un minimālajām amplitūdu vērtībām n periodiem no eksperimentā iegūtām

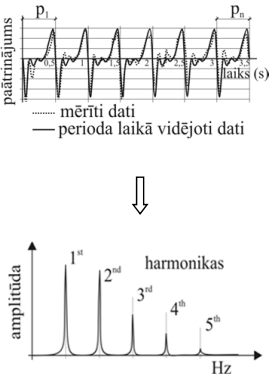
nepārtrauktām indivīda soļu slodzes izmaiņām laikā. Iegūto sakarību piemērs parādīts attēlā 4.



Att. 4. Sakarības starp amplitūdu un soļu frekvenci: a) garenvirzienā, kāpjot augšup; b) šķērsvirzienā, kāpjot augšup

1. Tabula

Izstrādātās metodes ekvivalentās (vidējošanās) gājēju slodzes analītiskās izteiksmes noteikšanai pamatprincipi

Nr. p.k.	Darbība	Ilustrācija vai paskaidrojums
1.	Izmērīt individuālās gājēju pātrinājuma izmaiņas laikā (WAH_i) un transformēt iegūtos mērījumus no sensoru lokālām asīm uz globāliem virzieniem, ņemot vērā 3. att. parādīto leņķi α .	 mērīti dati — perioda laikā vidējoti dati amplitūda 1st 2nd 3rd 4th 5th harmonikas Hz
2.	Sadalīt WAH_i atsevišķos periodos p_n (Δt) un veikt periodu vidējošanu, lai iegūtu ekvivalento periodu un vienas personas WAH :	
	$p_{eq}(\Delta t) = \sum_{i=1}^n p_n(\Delta t) / n$	
3.	Transformēt datus no laika diapazona uz frekvenču spektru, izmantojot diskrēto Furjē transformāciju (FFT):	
	$p_{eq}(\Delta t) \Rightarrow p_{eq}(\Delta f)$	

4. Noteikt DLF vērtību un atbilstošo fāzu nobīdi katrai personai no $p_{eq}(\Delta f)$, lai iegūtu atsevišķās harmonikas un individuālā gājēja slodzes izmaiņas laikā (WFH_i) analītisko izteiksmi (5):

$$c_n(t) = \chi \sum \lambda^i \sin(2\pi f_i t + \varphi^i). \quad (5)$$

(i – harmonikas kārtas numurs, n – kopējais iesaistīto harmoniku skaits, λ^i – $i^{\text{tās}}$ harmonikas Furjē koeficients (DLF), f_i – $i^{\text{tās}}$ harmonikas frekvence (Hz), φ^i – $i^{\text{tās}}$ harmonikas fāzu nobīde, χ – skat. 5. punktu)

5. Vajadzības gadījumā lietot vērtības korekcijas koeficientu, lai laukumu summa zem iegūtās funkcijas sakristu ar eksperimentāli iegūtām slogojuma vēsturēm:

$$\chi = \sum_{i=1}^n A_{\text{exp}} / \sum_{i=1}^n A_{\text{ave}} \quad (6)$$

6. Veikt vidējošanu starp WFH_i funkcijām, lai iegūtu ekvivalento (vidējo) gājēju slodzes izmaiņu laikā:

$$c_{eq}(\Delta t) = \sum_{i=1}^n c_n(\Delta t) / n \quad (7)$$

7. Pārveidot no laika diapazona uz frekvenču diapazonu, izmantojot FFT:

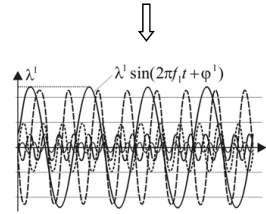
$$c_{eq}(\Delta t) \Rightarrow c_{eq}(\Delta f) \quad (8)$$

8. Noteikt vidējo gājēju slodzes izmaiņas laikā DLF vērtību (λ_{eq}^i) un atbilstošo fāzu nobīdi no $c_{eq}(\Delta f)$, lai iegūtu atsevišķās harmonikas un vidējo gājēju slodzes izmaiņas laikā analītisko izteiksmi vertikālajam virzienam (9) un šķērsvirzienam vai garenvirzienam (10):

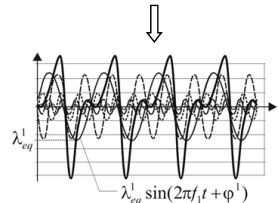
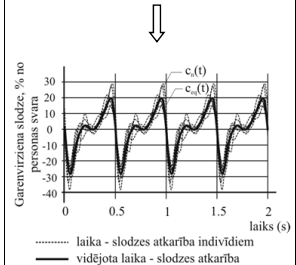
$$F_{\text{vert}}(t) = G + \sum_{i=1}^n G \lambda_{eq}^i \sin(2\pi f_i t + \varphi_{\text{vert}}^i) \quad (9)$$

$$F_{\text{long,lat}}(t) = \sum_{i=1}^n G \lambda_{eq}^i \sin(2\pi f_i t + \varphi_{\text{lat,long}}^i) \quad (10)$$

(G ir subjekta ķermeņa statistiskais svars (N))



(n – kopējais periodu skaits, A_{ave} – i^{ta} perioda paātrinājuma (tikai pozitīvie) laukums zem WFH_i funkcijas, A_{exp} – i^{ta} perioda paātrinājuma (tikai pozitīvie) laukums zem (WAH_i) funkcijas)



Tādejādi, iegūstot sakarības starp amplitūdu un soļu frekvenci augšup un lejup kāpšanas gadījumā, iegūta arī dominējošo harmoniku DLF vērtību atkarība no soļošanas frekvences. Piemēram, tika atklāts, ka augšup kāpšanas gadījumā garenvirziena spēka amplitūda ir lielā mērā atkarīga no soļošanas tempa, skat. 4. attēlu:

$$DLF_n(f) = DLF_n(2\text{Hz}) \cdot (1.49f - 1.98), \text{ ja } 1\text{Hz} \leq f \leq 2.3\text{Hz} \quad (11)$$

kur

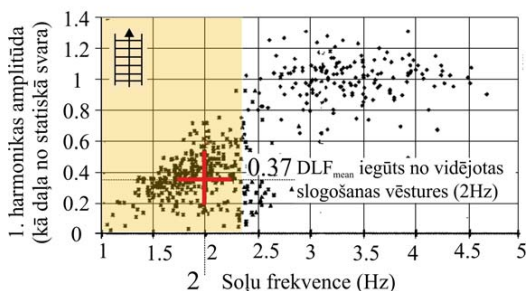
f – soļu frekvence, Hz;

n – harmonikas kārtas numurs ($n=1\dots 2$);

$DLF_n(f)$ – n -tās harmonikas dinamiskās iedarbes koeficients pie soļu frekvences f ;

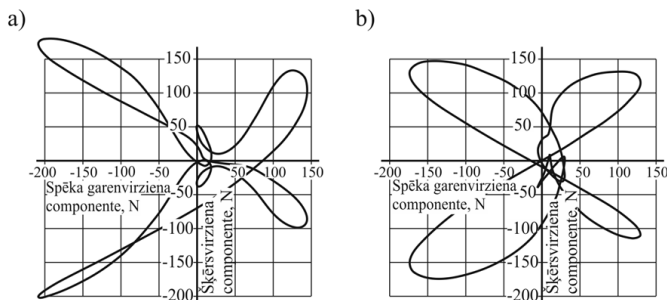
$DLF_n(2\text{Hz})$ – dinamiskās iedarbes koeficients pie soļu frekvences 2 Hz un atbilstošās fāzu nobīdes n -tai harmonikai, kas norādītas autores publikācijās [48] II-IV tabulā.

Lai metodi pārbaudītu, iegūtās vidējās DLF_i vērtības (kāpšanai augšup ar 2Hz un kāpšanai lejup ar 2,15 Hz) tika salīdzinātas ar S.C.Kerra [72] iegūtajām vertikālā spēka komponentes DLF_i vērtībām. Aplūkojot pirmās harmonikas rezultātu sakrišana vērtējama kā ļoti laba (Att. 5). Otrā harmoniku rezultāti nedaudz atšķiras, un tas atbilst B.Deivisa [29] priekšlikumam, otrajai harmonikai lietot augstāku vērtību. Kerra dati par otro harmoniku ir ļoti izklaidēti, un vidējā vērtība nav atkarīga no soļošanas tempa (kāpjot lejup), kas neatbilst realitātei.



Att. 5. Pirmās harmonikas vērtības, kāpjot augšup pa kāpnēm (salīdzinājums ar Kerra datiem)

Augšup un lejup kāpšanas procesu atšķirības parādītas 6a un 6b. attēlā, kas iegūti no ekvivalentās (vidējotās) gājēju slodzes izmaiņas laikā.



Att. 6. Gājēja vidējā spēka vektora galapunkta trajektorija: a) kāpjot augšup ar frekvenci 2 Hz; b) kāpjot lejup ar frekvenci 2,15 Hz;

Tika secināts, ka, lai aptuveni reproducētu reālas gājēju slodzes izmaiņas laikā vertikālā virzienā, garenvirzienā un šķērsvirzienā, ir nepieciešamas vismaz trīs harmonikas. Tās ir harmonikas, kuru DLF vērtība pārsniedz 0,05. Vertikālā virziena un garenvirziena gadījumā būtu jāizmanto trīs pirmās harmonikas, bet šķērsvirziena gadījumā būtu jāizmanto pirmā, trešā un piektā harmonika.

Pētījumā piedāvāto metožu galvenās priekšrocības ir šādas:

- tā kā nepastāv laboratorijas apstākļu noteikti ierobežojumi, ir iespējams plašā apstākļu diapazonā noteikt cilvēka radīto dinamiskos spēkus, kas dažādu darbību rezultātā ietekmē konstrukciju;
- mērīšanas iekārtām nav būtiskas ietekmes uz cilvēku dabiskajām kustībām;
- instrumentu izmaksas nav lielas: nepieciešami divi akselerometri, kas var uzglabāt un lejupielādēt datus;
- metode ļauj iegūt ne tikai dinamisko iedarbju koeficientus, bet arī ar vidējo gājēja slodzes izmaiņas laikā saistītās fāzu nobīdes vērtības;
- iegūtās analītiskās vidējās funkcijas satur informāciju par personas soļu neregularitāti un atšķirībām starp gājēju slodzes izmaiņām laikā, taču joprojām ir uzskatāms par deterministisko spēku modeli. Atšķirībā no varbūtiskā spēku modeļa to ir ērtāk pielietot, veicot attiecīgās konstrukcijas analītiskos aprēķinus.

3. Režģotu torņu svārstības gājēju dinamisko iedarbju rezultātā

Šajā promocijas darba nodaļā ir aprakstīti eksperimentālie un teorētiskie pētījumi par vieglu režģotu publiski pieejamo skatu torņu dinamiskajiem parametriem un svārstību amplitūdām (paātrinājumu) pie dažādiem cilvēka radītiem dinamiskiem slodzes veidiem. Balstoties uz šiem pētījumiem izstrādāts metodoloģijas algoritms maksimālās režģota torņa svārstību paātrinājuma vērtības atrašanai no tipiskām gājēju dinamiskām slodzēm.

Lai izstrādātu metodi vieglu un lokanu torņveida konstrukciju maksimālo svārstību noteikšanai svarīgi ir izpētīt jau esošo konstrukciju dinamiskos parametrus un to svārstību amplitūdas, ko rada cilvēku pārvietošanās pa konstrukciju. Tāpēc pētījuma eksperimentālajā daļā ir analizēta lielākā daļa Latvijā publiski pieejamo vieglu režģotu skatu torņu dinamiskā darbība un to dinamiskie parametri. Kopumā dati iegūti par 19 režģotiem skatu torņiem tomēr detalizētos pētījumos izmantoti no tiem 12, kuriem vizuāli konstatēts apmierinošs tehniskais stāvoklis. Izpētīto torņu tipiskie ģeometriskie un dinamiskie parametri, kā arī novērotais svārstību maksimālais paātrinājums, ir attēloti 2. tabulā. Datu apstrādei tika izmantoti spektrālās analīzes teorijas elementi.

4. Tabula

Izpētīto Latvijas režģoto skatu torņu tipiskie dinamiskie parametri (kopsavilkums)

Tipisko parametru diapazons	Koka konstrukcijas	Tērauda konstrukcijas
Augstums	19 – 34 m	20 – 36.5 m
Izmērs plānā zemes līmenī	4.8 – 9.4 m	1.5* – 9.5 m
Pamatfrekvence	1.2 – 1.6 Hz	0.8 – 2.6 Hz
Rimšanas koeficients	3.1% – 3.85 %	≈1%**; 1.7% – 2.7%
Maksimālā svārstību amplitūda no apmeklētāju pārvietošanos (paātrinājums)	0.15 – 0.4 m/s ²	0.2 – 0.5 m/s ²

* – galvenā šķērsvirziena stinguma sistēma

** – pilnībā metināta konstrukcija

Dažādos apstākļos izmērītie konstrukciju paātrinājumi (tie izmantoti arī dinamisko parametru noteikšanai) parāda, ka visnelabvēlīgākais gadījums, kas normālos ekspluatācijas apstākļos var tikt sasniegts un visaugstākais torņa dinamiskās reakcijas līmenis, ir tad, ja kompakta apmeklētāju grupa kāpj lejup pa torņa kāpnēm (skat. 7. att.).

Šajā pētījuma daļā no eksperimentālajiem rezultātiem tiek secināts, ka vieglas un lokanas vertikālas konstrukcijas, kā skatu torņi, kuru pašsvārstību frekvences ir līdzīgas cilvēka soļu frekvencēm, ir pakļauti svārstībām to rezonanses modās. Atšķirībā no tiltiem, kuru šūpošanos šķērsvirzienā rada cilvēku soļu spēka šķērsvirziena komponente, torņveida konstrukcijās svārstības rada cilvēku soļu spēka šķērsvirziena un garenvirziena komponente. Konstatēts, ka cilvēku kustība pa kāpnēm un torņa dinamiskās atbildes reakcija (*dynamic response*) nav tiešā veidā (lineāri) saistītas ar eksperimentā iesaistīto personu skaitu jeb apmeklētāju grupas lielumu.

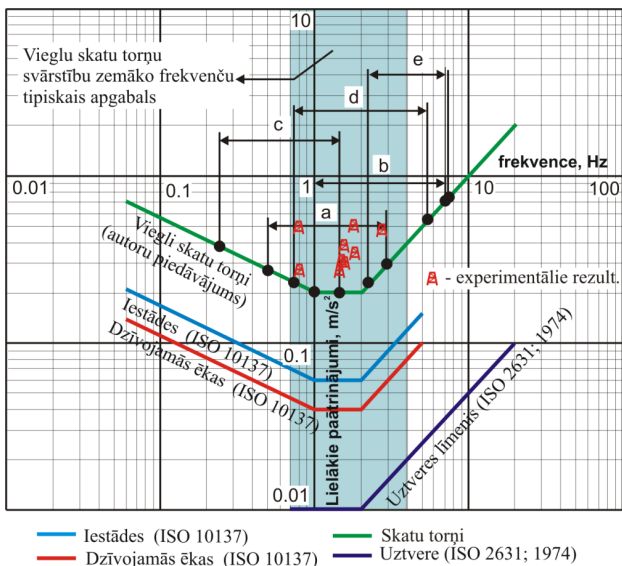


Att. 7. Piemērs torņa dinamiskai reakcijai dažādos slogošanas gadījumos

Detalizētāka analīze veikta ekscentriskas konstrukcijas tērauda skatu tornim Dzintaros, kad eksperimentāli noteikta atsevišķo kāpšanas harmoniku ietekme uz svārstību amplitūdu dažādām torņa pašsvārstību frekvencēm. Papildus salīdzinātas eksperimentāli iegūtās un ar galīgo elementu rēķinu palīdzību noteiktās konkrētā torņa pašsvārstību frekvences.

Tālāk izvirzīti kritēriji pieļaujamo svārstību paātrinājumu robežvērtībām. Pamatojoties uz apmeklētāju subjektīvo vērtējumu par visu pārbaudīto torņu svārstību līmeni, tiek piedāvāta sākotnējā līkne — lielākā paātrinājuma ierobežojums, kas nodrošina apmeklētājiem maksimālu komforta līmeni. Šo

Ļikni iespējams modificēt ar koeficientiem, kas ievērtē konkrētās konstrukcijas tipu un novietojumu, sasniedzamo komforta līmeni vai citus apstākļus. Zemāk redzamajā grafikā (8. attēls) ir atliktas eksperimentāli iegūtās dažādu torņu paātrinājumu vērtības, pie kurām apmeklētāji izjuta zināmu diskomfortu. Papildus ir attēloti arī cilvēka soļošanas harmoniku tipiskie frekvenču diapazoni.



Att. 8. Komforta kritēriji (informāciju par “a” līdz “e” sk. 3. tabulā)

5. Tabula

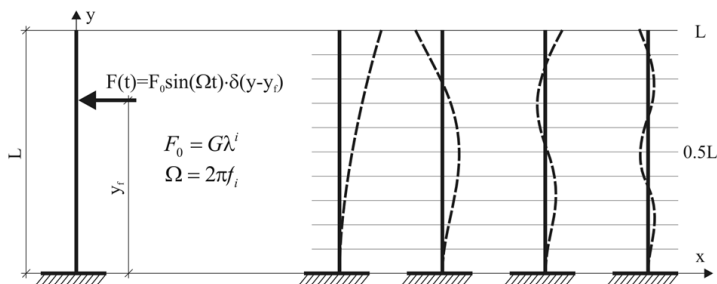
Augšup vai lejup kāpšanas harmoniku tipiskie frekvenču diapazoni

Frekvenču diapazona nosaukums	Frekvence f_1 , Hz
Spēka garenvirziena komponentes 1. harmonika (a)	$0.5 \leq f_1 \leq 3$
Spēka garenvirziena komponentes 2. harmonika (b)	$1 \leq 2f_1 \leq 6$
Spēka šķērsvirziena komponentes 1. harmonika (c)	$0.25 \leq f_1 / 2 \leq 1.5$
Spēka šķērsvirziena komponentes 3. harmonika (d)	$0.75 \leq 3f_1 / 2 \leq 4.5$
Spēka šķērsvirziena komponentes 5. harmonika (e)	$1.25 \leq 5f_1 / 2 \leq 7.5$

kur f_1 ir gājēja kāpšanas frekvence

Pētījuma teorētiskā daļā īpaša uzmanība tiek veltīta skatu torņu dinamiskai reakcijai (*dynamic reaction*), ja tai pieliktas dažādas soļošanas harmonikas (kustības komponentes) no individuāliem apmeklētājiem, kā arī no apmeklētāju grupām ar dažādu apmeklētāju skaitu tajās.

Lokani skatu torņi ir lineāras konstrukcijas, kas dinamiskās reakcijas analīzes nolūkos tiek modelētas kā konsole ar visā augstumā vienmērīgi izkliedētu masu (9. att.).



Att. 9. Aprēķinu shēma un modu formas

G – subjekta ķermeņa statistiskais svars; λ^i – harmonikas Furjē koeficients (DLF); f_i – harmonikas soļa frekvence; L – torņa augstums

Viskozi rimstošas sistēmas reakcija uz harmonisku ierosmi var tikt izteikta labi zināma nehomogēna diferenciālvienādojuma formā (12):

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[EI(y) \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \right] + m(y) \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + c(y) \frac{\partial x}{\partial t} = F(y, t) \quad (12)$$

Eksperimentāli iegūto datu un aprēķināto vērtību būtiskā neatbilstība parastajam pieņēmumam, ka konstrukcija sasniedz stacionāru svārstību stāvokli, parāda, ka torņi šādu svārstību stāvokli nesasniedz, jo slodze tiek pielikta ar mainīgu periodiskumu un dažādiem virzieniem, kas ir jāņem vērā aprēķinos.

Iegūtais kustības vienādojuma (12) risinājums (13), piemēram, pārvietojums, ja sākuma noteikumi vienādi ar nulli un ja ir ņemta vērā viskozā rimšana, iekļauj vibrāciju pirmo stadiju, kad stacionārs stāvoklis vēl nav sasniegts:

$$x(y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Phi_i(y) Q_0^i}{m \omega_i} \left[\frac{\bar{\omega}_i (p_1^i \sin \Omega t - 2 \xi_i \Omega \cos \Omega t) + \Omega (p_2^i \sin \bar{\omega}_i t + 2 \xi_i \bar{\omega}_i \cos \bar{\omega}_i t) e^{-\xi_i t}}{D} \right] \quad (13)$$

kur:

$$p_1 = \overline{\omega_i^2} + \xi_i^2 - \Omega^2; \quad (14)$$

$$p_2 = \Omega^2 + \xi_i^2 - \overline{\omega_i^2}; \quad (15)$$

$$D = \left(\xi_i^2 + \Omega^2 + \overline{\omega_i^2} \right)^2 - 4\Omega^2 \overline{\omega_i^2}. \quad (16)$$

ξ - rimšanas koeficients;

Φ_n - svārstību forma;

m - konstrukcijas masa uz garuma metru, kg/m;

ω_n - torņa leņķiskā pašsvārstību frekvence, rad/s;

$\frac{Q^i}{m}$ - modālā masa.

Tādiem nehomogēniem diferenciālvienādojumiem ar konstantiem koeficientiem kā (12) konkrēto risinājumu var aprēķināt atsevišķi katrai funkcijai vienādojuma labajā pusē. Līdz ar to, izmantojot (13) vienādojumu, var aprēķināt maksimālo reakciju no katras soļošanas harmonikas. Rezultātus saskaitot, tiek iegūta konstrukcijas kopējā reakcija pēc noteikta skaita “sekmīgu soļu” (izteikta kā laika moments):

$$\begin{aligned} & \frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = G\lambda_1 \sin(\Omega_1 t + \delta_1) \\ & + \\ & \frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = G\lambda_2 \sin(\Omega_2 t + \delta_2) \\ & + \\ & \dots \\ & + \\ & \frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = G\lambda_n \sin(\Omega_n t + \delta_n), \end{aligned} \quad (17)$$

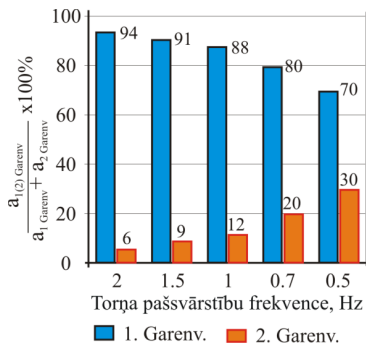
kur:

λ_i - i -tās harmonikas dinamiskās iedarbes koeficients (DLF);

n - konkrētās soļošanas harmonikas kārtas numurs;

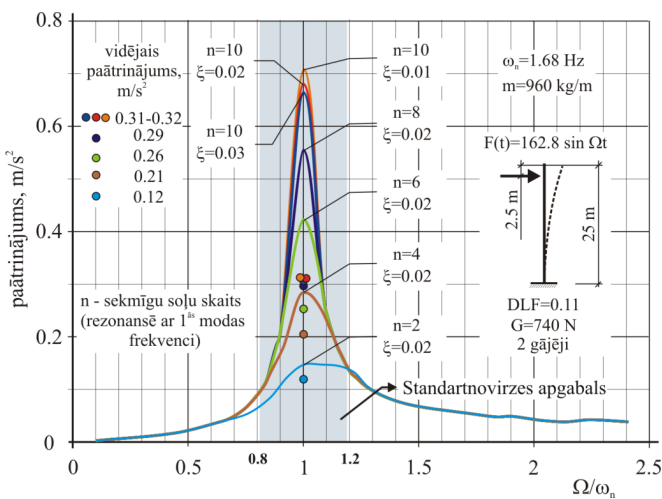
δ_n - konkrētās soļošanas harmonikas fāzu nobīde.

Dažādu soļošanas harmoniku ietekme uz kopējo konstrukcijas svārstību amplitūdu ir lielā mērā atkarīga no konstrukcijas pamatfrekvences. Zemāk 10. attēlā ir parādīts visbiežāk sastopamais gadījums, kad pirmās harmonikas garenvirziena komponente sakrīt ar konstrukcijas pašsvārstību frekvenci.



Att. 10. Sakarība starp konstrukcijas pašsvārstību frekvenci un atsevišķu garenvirziena soļošanas harmoniku ietekmi uz kopējo vibrāciju

Situācijai, kad kāda no soļošanas harmonikām ir tuvu kādai no torņa pašsvārstību frekvencēm, piemīt gadījuma raksturs. Gandrīz pilnīga sakrišana ilgākā laika periodā ir iespējama tikai ar nelielu varbūtību, jo personas, kāpjot augšup vai lejot, maina kāpšanas ātrumu. Turklāt kāpnēm ir pagriezieni, un tie ietekmē soļu ritmu. Tā kā ierosme ir nevienmērīga, slogošanas ilgumam (secīgu sekmīgu soļu skaitam) ir liela ietekme uz torņa dinamisko reakciju, bet nelielas konstrukcijas rimšanas koeficientu atšķirības reakciju būtiski neietekmē. Attiecība starp soļošanas tempu un konstrukcijas pašsvārstību frekvencēm ir viens no galvenajiem parametriem, lai noteiktu konstrukcijas svārstības cilvēka iešanas slodžu ietekmē (11. attēls).

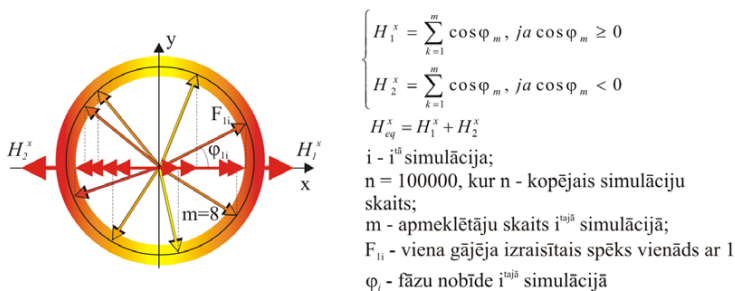


Att. 11. Piemērs torņa reakcijai ar dažādiem frekvenču koeficientiem

Lai ievērtētu iespējamās atšķirības konkrētās soļošanas frekvences attiecībai ar ierosināto konstrukcijas pašsvārstību frekvenci, ieteikts aprēķināt vidējo vērtību torņa reakcijai uz izvēlēto soļu skaitu koeficientu diapazonā $1 \pm 20\%$ no Ω/ω_n (pamatojoties uz eksperimentu rezultātiem).

No pētījuma eksperimentālās daļas ir skaidrs, ka sakarība starp torņu apmeklētāju skaitu grupā un konstrukcijas dinamisko reakciju uz šo ierosmi nav lineāri pieaugoša. Lai gan ir ļoti ticams, ka grupas locekļi, sekojot viens otram, kāps ar vienādu ātrumu, fāzu nobīdes starp soļiem būs dažādas. Idealizēts ekvivalents cilvēku skaits, kas pilnībā sinhronizē soļus, ir ērts veids, kā šādu slodzi ievērtēt būvkonstrukciju aprēķinos.

Līdz ar to tika izmantots “Mathcad” programmā iestrādātais nejaušu skaitļu ģenerators, lai modelētu fāzu nobīdes sadalījuma gadījuma raksturu pie dažāda cilvēku skaita grupā un lai tādējādi noteiktu ekvivalento cilvēku skaitu H_{eq} konkrētajā virzienā. Tika veiktas $n=10^5$ simulācijas grupām, kas sastāv no 2 līdz 20 cilvēkiem. Piemērs ar 8 cilvēku grupu ir parādīts 12a un 12b. attēlā.



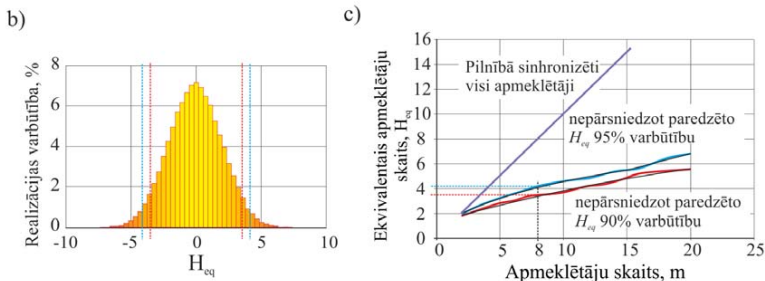
Att. 12a. Fāzu nobīdes sadalījuma individu starpā simulācijas piemēra aprēķina shēma

Simulācijas aprēķinu rezultātā iegūtas sakarības starp grupas dalībnieku skaitu m un ekvivalento apmeklētāju skaitu H_{eq} , kas aprakstītas ar vienādojumiem nepārsniedzot paredzētās varbūtības 95% (18) un 90% (19) līmeni:

$$H_{eq}^{95\%} = 0.001m^3 - 0.0353m^2 + 0.6249m + 0.845 \quad (18)$$

$$H_{eq}^{90\%} = -0.0035m^2 + 0.2831m + 1.3419 \quad (19)$$

Piemēram ar 8 apmeklētājiem, blīvuma funkcija no ekvivalentā cilvēku skaita grupā un sakarības starp cilvēku skaitu grupā un ekvivalento apmeklētāju skaitu parādītas 12c. attēlā.



Att. 12. b) astoņu apmeklētāju ekvivalentā personu skaita grupā H_{eq} blīvuma funkcija;
c) attiecība starp cilvēku skaitu grupā un ekvivalento apmeklētāju skaitu H_{eq}

Iegūtās attiecības $r_{90\%} = H_{eq}^{\text{skaitis grupā}} / H_{eq}^{\text{skaitis grupā}}$ samērā precīzi atbilst pētījuma eksperimentālajā daļā iegūtajiem datiem. Salīdzinājums atspoguļots darbā tabulā četriem no skatu torņiem (diviem tērauda un diviem koka torņiem):

6. Tabula

Eksperimentālo un teorētisko rezultātu salīdzinājums

Tornis	Salīdzinātās cilvēku grupas (skaits grupā)	Teorētiskie rezultāti ar pieņemto varbūtību		Eksperimentālie rezultāti, r_a	Atšķirība, %	
		$r_{90\%}$	$r_{95\%}$		$\frac{r_{90\%} - r_a}{r_{90\%}} \cdot 100\%$	$\frac{r_{95\%} - r_a}{r_{95\%}} \cdot 100\%$
Ūdru k.	7 & 2	1.67	1.95	$0.25/0.15 = 1.7$	-1.8	12.8
Priedaine	3 & 2	1.24	1.14	$0.21/0.15 = 1.4$	-12.9	-22.8
Dzintari	11 & 7	1.28	1.25	$0.48/0.39 = 1.23$	3.9	1.6
Kalsnava	9&2	1.9	2.21	$0.19/0.1 = 1.9$	0	14.0

Balstoties uz iepriekšējās nodaļās veiktiem teorētiskajiem un eksperimentālajiem pētījumiem, darbā soli pa solim aprakstīts izstrādātais metodoloģijas algoritms. To pielietojot inženiertehniskajos aprēķinos, iespējams noteikt maksimālo svārstību amplitūdu režģotiem skatu torņiem, ko izraisa apmeklētāju pārvietošanās pa būvi (20):

$$a_{mean} = 2,5 \int_{0,8}^{1,2} a_{max}(z) d(z), \quad (20)$$

kur:

a_{mean} - maksimālā svārstību paātrinājumu amplitūda, m/s^2 ;

$a_{max}(z)$ - maksimālā svārstību paātrinājumu amplitūda laikā t , m/s^2 ;

$z = \Omega / \omega_i$ - attiecība starp attiecīgo iešanas frekvenci un torņa pašsvārstību frekvenci;

$t = 2\pi / \omega_i$ - laiks pēc n "veiksmīgiem" soļiem.

Promocijas darba pilnajā variantā papildus nodemonstrēti divi aprēķina piemēri, izmantojot izstrādāto metodoloģiju. Pirmajā piemērā maksimālā svārstību amplitūda aprēķināta tipveida koka tornim, bet otrajā ekscentriskas konstrukcijas tērauda tornim Jūrmalā. Iegūtie teorētiskie rezultāti salīdzināti ar eksperimentāliem mērījumiem attiecīgajā situācijā un atspoguļoti darbā salīdzinošās tabulās. Šo rezultātu atbilstība eksperimentāli izmērītiem svārstību paātrinājumiem apliecina piedāvātās aprēķinu metodikas pamatotību.

4. Secinājumi

Darba ietvaros izstrādāta metode laikā mainīgu gājēju slodžu noteikšanai un aproksimēšanai, izdalot slodzes vertikālo, garenvirziena un šķērsvirziena komponenti, kā arī piedāvāta aprēķina metode, ar kuru iespējams noteikt šo slodžu maksimālo iespaidu uz vieglu režģotu torņu svārstību paātrinājumu un pārvietojumu amplitūdām.

- Piedāvātā inversās dinamikas metode, kas balstīta uz cilvēka smaguma centra kinematiku, eksperimentālai cilvēka soļu radīto laikā mainīgo spēku noteikšanai novērš vienu no lielākajiem trūkumiem iepriekš lietotajās metodēs - eksperimenta dalībnieku dabīgo kustību ierobežojumus eksperimenta laikā, kas būtiski ietekmē gājēja slodzes raksturu un amplitūdās.
- Piedāvātā eksperimentālo datu apstrādes metode vidējotās gājēju slodzes izmaiņas laikā noteikšanai (*mean walking force history*) ļauj vidējot tieši gājēju slodžu izmaiņas laikā, tādējādi iegūstot ne tikai vidējos dinamisko iedarbju koeficientus (DLF), bet arī vidējoto atsevišķo harmoniku atbilstošās fāzu nobīžu vērtības, un iespēju atrast analītisko funkciju tās aprakstam. Pēc jaunām metodēm iegūtās DLF vērtības ir pārbaudītas, salīdzinot ar citu pētnieku tradicionālā veidā (tiešos mērījumus) iegūtajiem datiem un rezultātu atbilstība apliecina piedāvāto metožu pamatotību.
- Eksperimentāli pirmo reizi iegūtie, ar dažādu ātrumu pa kāpnēm kāpjot personu, vidējie dinamiskās iedarbes koeficienti (DLF) un tiem atbilstošās fāzu nobīdes (priekš starptautiskā standarta ISO 10137:2007 tabulas A.4) parāda, ka tikai, kāpjot augšup, spēka šķērsvirziena un garenvirziena komponentu amplitūdās ir lielā mērā atkarīgas no soļošanas ātruma, bet lejup kāpšanas gadījumā, mainoties soļošanas ātrumam, atbilstošās DLF vērtības var uzskatīt par nemainīgām. Kāpšana pa kāpnēm lejup rada par 14% lielākas vertikālā spēka vērtības nekā kāpšana augšup. Lai analītiski aprakstītu reālu gājēju slodzes izmaiņu laikā vertikālā virzienā, garenvirzienā un šķērsvirzienā, jāizmanto vismaz trīs harmonikas: 1., 2. un 3. harmonika - vertikālajam un garenvirzienam, 1., 3. un 5. harmonika - šķērsvirzienam.
- Viegli režģoti skatu torņi, kuru pamatfrekvence zemāka par 3,3 Hz un stingums vai masa attiecīgi mazāki par $EI \leq 2 \cdot 10^6 L^{2.968}$ un

$m \leq 206241 \cdot L^{-1.032}$ cilvēku kustības radīto dinamisko iedarbju rezultātā teorētiski pakļauti riskam tikt iesvārstīti ar svārstību amplitūdu, kas nenodrošina torņa apmeklētājiem pieņemamu komforta līmeni. Pieliktās slodzes neperiodiskuma un virziena maiņas dēļ, režģoti torņi nesasniedz stacionāru svārstību stāvokli un vislielāko torņa svārstību amplitūdu var sasniegt, ja kompakta apmeklētāju grupa kāpj lejup pa kāpnēm. Savukārt iespējai, ka kāda no soļošanas frekvencēm ir tuvu kādai no konstrukcijas pašsvārstību frekvencēm, piemīt gadījuma raksturs. Gājēju grupas slodzes gadījuma raksturs var tikt ievērtēts ar teorētiski iegūtiem vienādojumiem, kas atspoguļo nelineāru attiecību starp reālo apmeklētāju skaitu grupā un idealizētu ekvivalento apmeklētāju skaitu. Atsevišķu soļošanas harmoniku ietekme uz kopējo svārstību amplitūdu ir atkarīga no konstrukcijas pamatfrekvences vērtības. Konstrukcijām, kuru pamatfrekvence ir augstāka par 2 Hz, dominējoša ir tikai vienas gājēju harmonikas ietekme.

- Piedāvātā sākotnējā līkne — lielākā paātrinājuma ierobežojums, kas nodrošinātu apmeklētājiem pieņemamu komforta līmeni, izveidota pamatojoties uz apmeklētāju subjektīvo novērtējumu par visu pārbaudīto torņu svārstību līmeņiem, kā arī citu pētnieku secinājumiem par cilvēkam pieņemamu svārstību paātrinājumu līmeni, parāda, ka pieļaujamie maksimālie paātrinājumi viegliem režģotiem skatu torņiem ir aptuveni 3,3 reizes lielāki kā augstceltņu biroja ēkām, kam šādi ierobežojumi ir noteikti normatīvajā bāzē.
- Izstrādātais algoritms, kas, balstīts uz darbā veiktajiem teorētiskajiem un eksperimentālajiem pētījumiem, ļauj noteikt maksimālo svārstību amplitūdu viegliem režģotiem torņiem no cilvēku pārvietošanās izraisītām gadījuma rakstura dinamiskām iedarbēm. Atkarībā no gājēju savstarpējās sinhronizācijas pakāpes aprēķinātās un eksperimentāli iegūtās paātrinājuma vērtības var atšķirties no 0 līdz 25%, kas apliecina piedāvātās aprēķinu metodikas pamatotību.

GENERAL REVIEW OF THE THESIS

Subject Actuality and Formulation of the Problem

Vibration of the light-weight structures caused by the movement of pedestrians has been a particularly topical research subject in the world for more than 10 years now. Many researchers found this topic attractive when previously unforeseen lateral vibration experienced more than 18 million British pounds worth London Millennium Footbridge on its opening day in 2000. The research of human-structure interaction topicality and complexity also confirm researchers' ongoing discussions at international conferences and forums.

The best-known structures that are sensitive to vibrations caused by human activity (walking, jumping, running, vandalism, etc.) are pedestrian bridges, slender stairs, grandstands or slender slabs. In the case of the pedestrian bridges, vibrations are mainly induced in a transverse direction and are basically caused by the pedestrian lateral component of load. Vibrations of the pedestrian bridges are relatively well studied, consequently the design recommendations have been developed to ensure an adequate pedestrian comfort.

In Latvia, other pedestrian load sensitive structures are found more often than light-weight pedestrian bridges – the observation towers and these structures have not been studied from the human-structure dynamic interaction perspective. Unlike pedestrian bridges, the observation towers are subjected to both a pedestrian load transverse and a longitudinal component.

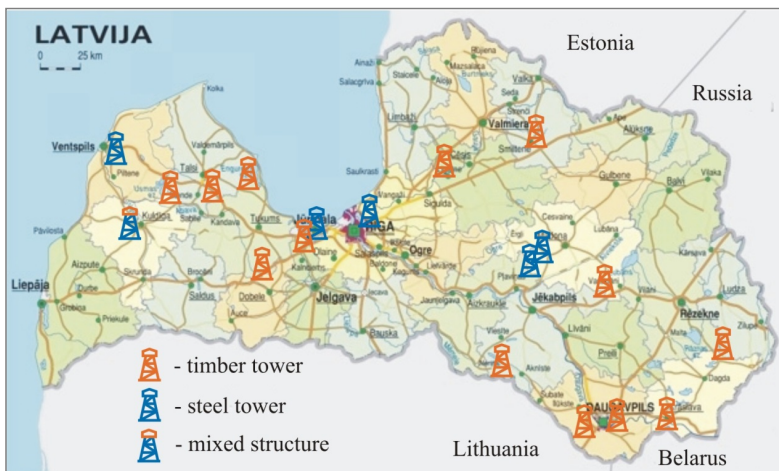


Fig. 1. Location of observation towers in Latvia

Historically, the free standing towers were primarily used by the military to provide a good observation of the surrounding area. Observation towers like Eiffel that are located in the cities are usually tall structures and serve as an architectural symbol but towers located in the countryside are designed to allow viewers an unobstructed view of the landscape and tend to have a design mostly driven by economic aspects.

Latvia has numerous observation towers mostly located in the regions of Latgale and Kurzeme. The map of light-weight lattice public observation towers that was inspected by the authors presented in Fig. 1. It was established that 18 observation towers of the 19 inspected are sensitive to human induced dynamic loads and vibrations cause uncomfortable feeling of visitors in certain circumstances.

Almost half of the observation towers are the responsibility of the state company JSC “Latvia’s State Forests” that continuously develop the environmental infrastructure objects. The recently opened for public (October, 2012) 28,5m high timber observation tower “Ančupānu skatu tornis” in Rezekne serves as an example. Although construction of such towers is rather expensive, it is a great way to increase tourist attraction to the area otherwise unpopular.



Fig. 2. a) An example of the steel observation tower (in Kalsnava); b) An example of the timber observation tower in the region of Latgale (Priedaine)

There are some examples of mixed structure e.g. timber structure (columns, beams, and cladding) with a steel rod lateral resisting system but mostly observation towers can be divided in timber (70% of the inspected towers) and

steel structures. An example of a typical steel and timber observation tower is presented in Fig. 2.

Most of the towers in Latvia have a set of rules to limit the number of visitors from 5 to 10 people, however this limit is not based on any research information and the construction is based purely on previous experience, especially for timber observation towers.

In 2010 a light-weight eccentric steel structure observation tower was opened for public in Jurmala, Dzintari and experienced an unexpectedly high level of vibration amplitudes that caused uncomfortable feelings to the visitors of the tower. This structure highlighted the lack of understanding and inadequate design information of the building codes, regarding the slender tower dynamic response to the human induced loads. It demonstrates that in areas with a low seismicity and relatively low wind loads the human induced dynamic loads could be determinative in a slender and light-weight observation tower design as well as in checking the serviceability criteria.

The research and better understanding of human induced dynamic loads and their correct application to the observation tower structure at the design stage is a necessary requirement to be able to develop aesthetically pleasing and economically justified light-weight structures in the future.

Objective of the Study

The objective of this study is to develop the method of analytical approximation of human movement induced dynamic loads based on the experimental investigation and to develop the calculation methodology for assessment of light-weight lattice self-supporting tower type structure dynamic response to typical human induced dynamic loads as well as to set a limit on the observation tower vibration acceleration amplitudes due to the comfort criteria of tower visitors.

The Tasks of the Thesis

Tasks that have to be resolved can be subdivided in two main groups in order to achieve the formulated objective of the thesis.

The first group of tasks associated with the experimental identification and approximation of human induced time varying forces:

- To develop the new method of experimental identification of the footfall induced forces that is not restricted to the laboratory environment and therefore does not have strong influence on a person during the tests move naturally and is suitable for the civil engineering applications;

- To develop an experimental data processing method of obtaining the mean continuous walking force history of a person that could be analytically approximated and therefore used in analytical calculations of observation tower response to human induced loading;
- To obtain dynamic load factors and corresponding phase shifts of footfall induced forces on stairs by the newly developed method and compare to other researcher work data that is available for justification of the newly developed method;

The second group of tasks has to be resolved is associated with the application of those loads to the lattice self-supporting tower structure and finding its response to it:

- To obtain the dynamic and geometric parameters of most of the public observation towers in Latvia and to develop the criteria for tower type structures that are sensitive to the human movement as well as experimentally identify the loading events from human movement under actual serviceability conditions that cause the highest response levels of observation tower vibration;
- To develop preliminary recommendations of criteria that would ensure the acceptable comfort level for the observation tower visitors based on the observations made during the experimental researches (subjective assessment);
- To assess the different parameters (structural damping, ratio between pacing rate and natural frequencies of the structure, stiffness of the structure, separate walking harmonic importance, number of the visitors, mode of vibration etc.) importance and contribution to the dynamic response level of observation tower and based on that develop calculation methodology and recommendations for assessment of light-weight lattice tower type structure dynamic response to typical human induced dynamic loads.

The Scientific Novelty of the Work

It is experimentally and theoretically proven that vertical light-weight cantilever type structures like public observation towers with a fundamental frequency less than 3.3 Hz may undergo vibrations induced by human activities that do not satisfy the serviceability limit criteria – the required comfort criteria during the structure exploitation.

The scientific novelties of the work as well as tasks to be resolved can be subdivided in to two groups. The first group is associated with the experimental

identification and approximation of human induced time varying forces but the second group is associated with the application of those loads to the lattice self-supporting tower structure and the dynamic response to them.

A new method from the branch of progressive inverse dynamic methods is developed that allows estimating dynamic forces induced by human activities (walking, running, jumping and body swaying) under a wide range of conditions (no limitations of laboratory environment) for civil engineering applications. Comparing to the traditional direct measurement methods several advantages can be highlighted such as required instruments cost relatively low, there is a possibility to obtain records over longer periods of time (continuous walking force histories) and test setup does not have a strong influence on human ability to behave or move naturally.

The experimental data processing method of obtaining the analytical expression of the mean continuous walking force histories is proposed. The approach preserves an important parameter such as the phase shift of relevant walking harmonic and obtained analytical expression of the mean continuous walking history can be further used in analytical calculations of the structure under consideration.

The mean dynamic load factors, the corresponding phase shifts and their dependence from the pacing rate of dynamic force longitudinal and lateral component for the actions of stair ascent and descent have been obtained for the first time.

As a result of experimental investigations the dynamic parameter data set (damping ratios, fundamental and natural frequencies of the structure) has been obtained for the first time of most of the lattice observation towers opened for public in Latvia.

Methodology of light-weight lattice tower maximum dynamic response calculation due to towers visitors' movement is given for the first time. It is based on the performed studies about the range of parameters of structures that require considering the human dynamic loads, applicable loads and its dispositions as well as the analytical solution for preliminary design calculations and the criteria to limit vibrations due to comfort of visitors.

Practical Application of the Thesis

The main practical gain as a result of reaching the doctoral thesis objective is that the methodology and recommendations of light-weight lattice tower type structure maximum dynamic response calculation to the typical human induced loads under structure serviceability conditions is given for the first time. This is useful material for the structural engineers working in the industry and

undertaking the design of public observation towers as any other design information regarding this subject is not available.

The proposed calculation method provides possibility to justify, correct the set of rules that limit the number of visitors at a time on most of the public observation towers in Latvia.

The obtained mean dynamic load factors, corresponding phase shifts and their dependence from pacing rate of a person stair ascending and descending dynamic force of all three components is supplementary information to Table A.4. of International Standard ISO 10137:2007 were presented examples of design parameters due to one person ascending or descending stairs only for first two harmonics of vertical direction.

During the research computer program of experimental data visualization was developed and can be successfully implemented as a quick tool of structure vibration level assessment during the dynamic testing.

Therefore the developments in the thesis are the necessary base to be able to develop more economically justified and aesthetically pleasing light-weight lattice observation towers for public use in the future.

The developed computer program of experimental data visualization can be successfully implemented as a quick tool of structures vibration level assessment during the dynamic testing.

Therefore the developments in the thesis is the necessary base to be able in the future develop more economically justified and aesthetically pleasing light – weight lattice observation towers for the public use.

The Methodology of the Research

The bases of the new method of obtaining dynamic forces from human movement by utilizing accelerometry technology is Newton's Second Law of Motion and researches done in the field of biomechanics about the kinetics of human motion. To take into account the stochastic nature of the human loading, an algorithm has been developed that uses the random number generator integrated in the commercial software “Mathcad”.

Post processing of the experimental data to obtain the frequency spectrums is mostly done by the commercial software “ME’scopeVES” (version 5.1.2010.1215) from “Vibrant technologies”. The computer program of experimental data visualization to assist the dynamic testing was developed in Adobe Air environment.

The differential equation of the Euler – Bernoulli prismatic cantilever beam is the base of the analytical model used in the theoretical investigations of self-supporting lattice tower response to human induced load. Commercial finite

element software STRAP (version 12.5) was used for carrying out the numerical experiments. The software uses the subspace iteration technique to extract the eigenvalues.

In the experimental research part accelerations measured by five 3-axis light weight (55g) USB accelerometers (Model X6-1A, producer - Gulf Coast Data Concepts, LLC).

Theoretical and Methodological Bases of the Research

The performed researches, developed calculation models and methods are based on the following engineering science branches:

- Structural dynamics;
- Structural engineering;
- Structural mechanics;
- Biomechanics;
- Modal and experimental modal analysis;
- Probability theory;
- Signal analysis.

Scope of the Study

The use of the developed methodology of light-weight lattice self-supporting tower maximum dynamic response calculation due to tower visitor movement is appropriate when the following requirements are fulfilled:

- 1) the maximum stress in the elements of the structure are less than limiting stresses of ultimate limit state;
- 2) the maximum displacements of the structure from appropriate wind loading are less than the limiting displacements of serviceability limit state.

The developed methodology is based on the experimental investigations of existing full scale timber and steel observation towers. The newly developed methodology is rational to use for the self-supporting towers with parameters in the following range:

- height L above the ground level: $15m \leq L \leq 50m$;
- stiffness EI and mass per meter m :

$$EI \leq 2 \cdot 10^6 L^{2.968} ;$$

$$m \leq 206241 \cdot L^{-1.032} ;$$

(the authors restrictions of the term „slender” and light-weight” in the thesis)

- the fundamental frequency of the structure f : $f \leq 3.3Hz$.

The developed method that allows estimating dynamic forces induced by human activities is appropriate if the supporting structure on which activity is

performed has a remarkably higher fundamental frequency than activity frequency. Also if activities (walking, running, jumping or body swaying) are performed with the frequency or speed, close to constant and have a rectilinear pattern.

The obtained mean dynamic load factors and the corresponding phase shifts of person dynamic force longitudinal and lateral component for the action of stair ascent and descent are appropriate to use if stair inclination b is in a range of: $24^\circ \leq \beta \leq 42^\circ$. The obtained mean dynamic load factors and corresponding phase shifts of a person while stair ascent or descent are for walking frequency range of $1\text{Hz} \leq f_p \leq 2.3\text{Hz}$.

Results Presented for the Defense

1. The method of obtaining vertical, longitudinal and lateral components of human movement dynamic forces based on kinematics of the motion of human center of gravity (COG) (by utilizing accelerometry technology);
2. Experimental data processing method for obtaining the analytical expression of the mean continuous walking force history;
3. The mean dynamic load factors (DLF) and corresponding phase shifts of single person ascent and descent induced forces at different pacing frequencies;
4. The methodology of maximum vibration acceleration amplitude assessment of light-weight lattice self-supporting towers with different dynamic and geometric parameters due to human movement initiated dynamic loads of stochastic nature;
5. Preliminary recommendations of limiting the observation tower vibration acceleration amplitude to assure an acceptable comfort level of tower visitors.

Structure and Volume of the Doctoral Thesis

The thesis consists of Abstract, Introduction, Three main chapters divided into sub-chapters, Conclusion and Bibliography. Chapter 1 is a Literature review, Chapters 2 and 3 covers the attainment of the objective and tasks of the thesis.

Thesis contains 135 pages, 82 figures, 28 tables and reference list of 136 sources. Thesis language is English.

The Approbation of the Results - List of relevant International Conferences

1. RASD 2013 11th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, Italy, Piza, 1st – 3rd July, 2013 (Gaile L., Rādiņš I. Lattice Tower Dynamic Performance under Human Induced Loading).
2. The 9th International scientific conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, June 20-22, 2013 (Gaile L. Analysis of Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia).
3. The International Scientific Conference „Civil Engineering’13” of Latvia University of Agriculture. Jelgava, 16-17 May, 2013 (Gaile L., Rādiņš I. The Footfall Induced Forces on Stairs).
4. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni, Riga, Latvia, 11-12 October, 2012 (Gaile. L., Radinsh. I. Dynamic Loading and Response of Observation Towers and Gaile. L. Analysis of Dynamic Parameters of Timber and Steel Observation Towers).
5. 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012/USD2012). Belgium, Leuven, 17-19 September, 2012 (Gaile L., Rādiņš I. Steel Lattice Sightseeing Tower’s Horizontal Vibrations Induced by Human Movement).
6. 19th International Congress on Sound and Vibration Proceedings of Recent Developments in Acoustics, Noise and Vibration (ICSV19). Lithuania, Vilnius, 8-12 July, 2012 (Gaile L., Rādiņš I. Eccentric Lattice Tower Response to Human Induced Dynamic Loads).
7. International Conference on Civil and Construction (ICSCE 2012). Sweden, Stockholm, 11-12 July, 2012 (Gaile L., Rādiņš I. Human Induced Dynamic Loading on Stairs).
8. XVII International Conference on Mechanics of Composite Materials, 2012, May 28 - June 1, Jurmala (Gaile L., Rādiņš I. Assessment of the Fatigue Life of a Tower by Using a Real-Time Loading History).
9. Rīgas Tehniskās universitātes 52. Starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, 2011. gada 13.-16. oktobris. (L. Gaile, I. Rādiņš. Cilvēku izraisīto svārstību ietekme uz konsoles veida konstrukcijām).
10. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress "Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte", Sekcija "Tehniskās Zinātnes". (Gaile L., Rādiņš I. Ekscentriskas konstrukcijas darbība dinamisko slodžu ietekmē).

11. The International Scientific Conference „Civil Engineering'11” of Latvia University of Agriculture. Jelgava, May 12-13, 2011. (Gaile L., Radinsh I. Time Depending Service Load Influence on Steel Tower Vibrations).
12. The 8th International scientific conference „Environment. Technology. Resources”, Rēzekne, June 20-22, 2011. (Gaile L., Radinsh I. Dynamic Response of Tower Structures).

List of the Authors Scientific Publications on the Topic of the Thesis

1. Gaile L., Radinsh I. Lattice Tower Dynamic Response Calculation to Human Induced Loads: Case Study // 54th International Conference of Riga Technical University: „Innovative Materials, Structures and Technologies”, Riga, Latvia, November 8, 2013, (*accepted for publication*).
2. Gaile L., Radinsh I. Lattice Tower Dynamic Performance under Human Induced Loading // RASD 2013 11th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, Italy, Piza, 1st – 3rd July, 2013, pp.1-15.
3. Gaile L. Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Latvia, Rēzekne, 20-22 June, 2013, pp. 57-62.
4. Gaile L., Radinsh I. The Footfall Induced Forces on Stairs // „Civil Engineering'13”: 4th International Scientific Conference Proceedings, Part I, Latvija, Jelgava, 16-17 May, 2013, pp. 60-68.
10. Gaile L., Radinš I. Steel Lattice Sightseeing Tower's Horizontal Vibrations Induced by Human Movement // 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA2012/USD2012), (CD-ROM), Belgium, Leuven, 17-19 September, 2012, pp. 1211-1221, (*indexed in Thomson Reuters Web of Science*).
5. Gaile L., Radinš I. Eccentric Lattice Tower Response to Human Induced Dynamic Loads // 19th International Congress on Sound and Vibration Proceedings of Recent Developments in Acoustics, Noise and Vibration (ICSV19). Lithuania, Vilnius, 8-12 July, 2012, pp. 560-567, (*indexed in SCOPUS*).
6. Gaile L., Radinš I. Human Induced Dynamic Loading on Stairs // Proceedings of International Conference on Civil and Construction (ICSCE 2012). Sweden, Stockholm, 11-12 July, 2012. Issue 67, pp. 626-632.

7. Gaile L., Rādiņš I. Time Depending Service Load Influence on Steel Tower Vibrations // „Civil Engineering'11": 3rd International Scientific Conference Proceedings, Latvija, Jelgava, 12-13 May, 2011, pp. 144-149, (*indexed in SCOPUS*).
8. Gaile L., Rādiņš I. Dynamic Response of Tower Structures // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Latvia, Rēzekne, 20-22 Jun, 2011, pp. 85.-91.

SUBSTANCE OF THE DOCTORAL THESIS

Introductory part of the doctoral thesis contains a formulation of the problem, the objective and formulated tasks, the methodology to reach it, the scientific novelty and practical application of the study as well as defined the scope of the study.

1. Literature review

Literature review serves as a background and substantiation of theoretical and experimental investigations of the thesis. It consists of two chapters where the state of art approaches are analyzed when dealing with the identification of human dynamic loads, application to the structures and determination of the dynamic response of structures that are sensitive to human induced loads and serviceability criteria.

The structures where the most important source of vibration is human activity are highlighted in the thesis. Increasing vibration problems for slender and light-weight structures with low damping ratio show that to perform design based on the static load only is not enough anymore. The slender light-weight observation tower is one more structural type besides the well-known objects like grandstands [24, 35], slender floors [41], long span stairs [72] or footbridges [131] that are susceptible to human induced vibrations. The structural design of observation towers is mostly based on previous construction experience as there is no available guidance how to deal with dynamic loads other than wind load or earthquake. Lately the architectural aspects of the design are becoming more important and require better understanding of tower response to human induced loads in order to ensure the acceptable levels of vibrations to achieve acceptable comfort level of the structure visitors. Although there are cases of the excessive vibration problems of public light-weight observation towers [47], criteria for identification of the problem in the design stage is absent. This is a topical in regions like Latvia with generally flat terrain, relatively low wind loads and seismicity.

To develop basic methodology of observation tower dynamic response calculations underlying principles of the existing methodology for other structures (bridges and slender floors) that are sensitive to human induced loading in the chapter are reviewed [20, 37, 88, 89, 116, 130, 131].

Different serviceability criteria have been developed to ensure that the structure and its elements are suitable for the intended activity. The limit values of the lateral acceleration in the international codes are directly related to the structures users' comfort [54, 67]. Mainly values are given for the high-rise buildings of residential and office use or pedestrian bridges. To the best of the authors' knowledge there are no any available recommendations regarding the observation towers.

In thesis the present status of human dynamic load identification is discussed [22, 95, 116, 131]. Underlying principles of commonly used test methods are analyzed [68, 72, 95, 96]. The most common way based on the Fourier decomposition for perfectly repeatable footfalls is to represent walking force in the time domain as a sum of Fourier harmonic components. Here the Fourier coefficient of the i^{th} harmonic often referred to as dynamic loading factor (DLF_i) and is base of this model. Probabilistic force models are more suitable when simulating the walking forces as it is a stochastic narrow band process and depends on many parameters. Nevertheless more convenient from a design point of view would be the deterministic force model that has taken into account non periodicity of the force.

Regarding experimental techniques for ground reaction force (GRF) identifications it is concluded that the so called inverse dynamic methods have a great potential in the context of civil engineering applications to estimate continuous human induced forces applied to the structure under a wide range of conditions.

Although several recent extensive literature reviews and new guidelines highlight the interest of researchers in experimental identification and modeling of human walking forces, the major part of these researches is done for the human walking forces on the flat surfaces. Still there is a little work done on walking forces on the stairs for civil engineering applications. Remarkable discrepancies between calculated and experimentally measured slender stair responses to human walking loads confirm that loading models are still not complete and tuned properly. The author is not aware of any previously obtained information about stair ascending and descending force longitudinal components that are the main human dynamic forces required for observations tower dynamic response calculations.

The conclusions from the performed literature review are presented at the end of the literature review and based on them the objective of the study was developed. To be able to assess the dynamic response and performance of lattice self – supporting towers during the early stage of the designing process, the first group of tasks to be resolved is associated with the experimental identification and approximation of human induced time varying forces but the second group of tasks is associated with the application of those loads to the lattice self-supporting tower structure and finding its response to it.

2. Research on footfall induced forces

There are three main shortcomings of the available state-of-art experimental investigation methods that are used to obtain human footfall induced dynamic forces: strong influence on person move naturally during the tests, restriction to the laboratory environment and complex experimental set up. Especially influence on person move naturally during the tests lately is addressed as serious shortcoming [17] due to the fact that locomotion is adaptive in its nature and optimizes according to circumstances [1]. Therefore it is developed a new experimental method to obtain reliable results of GRF (ground reaction forces) for the civil engineering applications. Method is based on the kinematics of motion of human center of gravity (COG) to obtain the continuous walking force histories in three global directions. It is well known that the vertical walking force function might be obtained from a simple dynamic equilibrium based on the Newton's Second law (1).

$$F(t) = Mg + Ma(t), \quad (1)$$

For longitudinal or lateral walking force direction (2):

$$F(t) = Ma(t). \quad (2)$$

where

- M is body mass of the person,
- g – gravitational constant,
- a – acceleration of the COG.

To obtain reliable COG's acceleration data $a(t)$ accelerometry technology from the branch of progressive inverse dynamic methods was utilized. Illustration of the experimental set up presented in Fig. 3.

The acceleration of the 18 persons' (mixed group of men and women) center of gravity (COG) in vertical, lateral and longitudinal directions during stair ascent and descent were recorded to obtain individual continuous walking

force time histories. For test subjects there were several attempts with different pacing rates.

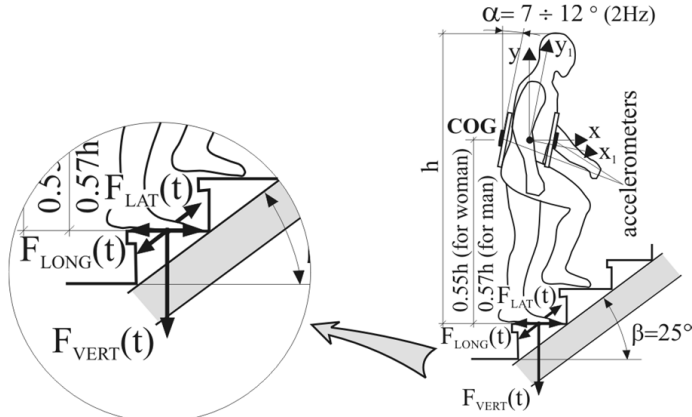


Fig. 3 Illustration of the experimental setup

Also new experimental data processing method of obtaining the mean (*equivalent*) continuous walking histories that takes into account the imperfectness of the repeated footfall of the individual as well the differences between the individual walking force histories by averaging them has been developed and presented in the thesis. Consequently it is possible to obtain the mean values of the DLF_i and the corresponding phase shifts φ_i that are the necessary parameters to obtain analytical walking force function based on the Fourier series. A step by step description with illustrations of the method is presented in the Table 1.

Although similar setup might be used for the identification of human dynamic forces from different activities there was a particular interest in stair ascent and descent cases as stairs are one of the key elements of light-weight lattice observations towers. The results and verification of the developed experimental data processing method are presented in the thesis in *Section 2.3* where the obtained mean DLF values for stair ascent and descent are compared and analyzed with DLF values obtained by other authors who used traditional footfall force measurement methods.

To obtain the relationship between the walking force amplitude A and pacing frequencies it is suggested do not take the separate DLF_i values corresponding to the relevant frequency but to take the mean value of the individual's experimental walking force history of n periods expressed as a range from maximum to minimum amplitude. Then it is a true reflection of force peak amplitudes opposite to the individual DLF values where connections

between the harmonics are not taken into account. An example of the obtained relationships is presented in the Fig. 4a and 4b.

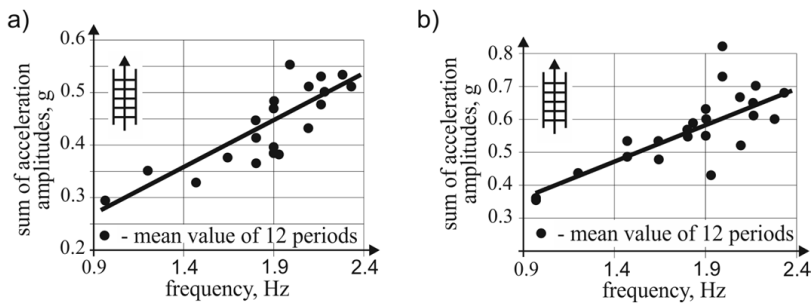
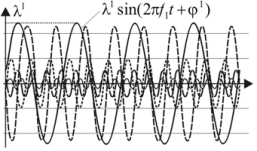
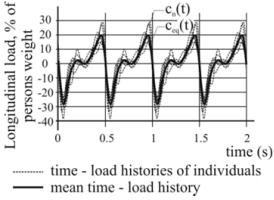
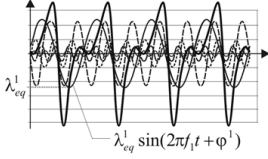


Fig. 4 Relationship of amplitude and pacing frequency
a) longitudinal component, ascent; b) lateral component, ascent

Table 1

Description of the new method for obtaining the equivalent continuous walking histories (analytical expressions)

N ^o	Action	Illustration or notes
1.	Measure individual walking acceleration histories (WAH_i) and transform the recorded measurements from the local axis of the sensors into global directions taking into account the angle α in Fig. 3	
2.	Divide individual walking acceleration histories (WAH_i) into periods $p_n(\Delta t)$ and perform period averaging to obtain the equivalent period and further WAH of the person: $p_{eq}(\Delta t) = \sum_{i=1}^n p_n(\Delta t) / n \tag{3}$	
3.	Perform transformation from the time domain to the frequency domain via FFT (Fast Fourier Transform): $p_{eq}(\Delta t) \Rightarrow p_{eq}(\Delta f) \tag{4}$	

4. 5. 6. 7. 8.	Find the DLF value and relevant phase shift for each individual in order to obtain separate harmonics and further the analytical expression of individuals' walking force history (WFH_i) (5): $c_n(t) = \chi \sum \lambda^i \sin(2\pi f_i t + \varphi^i). \quad (5)$ (i – order number of the harmonic, n – total number of contributing harmonics, λ^i – Fourier coefficient of the i^{th} harmonic often referred as DLF, f_i - i^{th} harmonic frequency (Hz), φ^i – phase shift of the i^{th} harmonics, χ – see step № 5) If necessary, use the correction coefficient for magnitude to maintain the same area under the function as the experimental data have: $\chi = \frac{\sum_{i=1}^n A_{exp}}{\sum_{i=1}^n A_{ave}} \quad (6)$ Perform averaging between the functions of WFH_i to obtain the equivalent (mean) continuous walking time history: $c_{eq}(\Delta t) = \sum_{i=1}^n c_n(\Delta t) / n \quad (7)$ Transformation from the time domain to the frequency domain via FFT: $c_{eq}(\Delta t) \Rightarrow c_{eq}(\Delta f) \quad (8)$ Find the DLF value (λ_{eq}^i) and relevant phase shift of $c_{eq}(\Delta f)$ in order to obtain separate harmonics and further the analytical expression of the mean walking force history in vertical (9) and lateral or longitudinal directions (10): $F_{vert}(t) = G + \sum_{i=1}^n G \lambda_{eq,y}^i \sin(2i\pi f_i t + \varphi_{vert}^i) \quad (9)$ $F_{long,lat}(t) = \sum_{i=1}^n G \lambda_{eq}^i \sin(2i\pi f_i t + \varphi_{lat,long}^i) \quad (10)$ (G is a static weight of the subject's body (N))	↓  (n – total number of periods, A_{ave} – area under the WFH_i function (only positive) of period i, A_{exp} – area under the WAH_i function (only positive) of period i) ↓  ↓ 
---	--	--

By using the new method DLF values of dominant harmonics for different pacing frequencies of stair ascent and descent have been obtained. For example it was found that longitudinal direction force amplitude strongly depends on the walking pace for stair ascending case (11):

$$DLF_n(f) = DLF_n(2Hz) \cdot (1.49f - 1.98) \text{ for } 1Hz \leq f \leq 2.3Hz, \quad (11)$$

where

f – pacing frequency, Hz;

n – number of the harmonic ($n = 1 \dots 2$);

$DLF_n(f)$ - dynamic load factor at pacing frequency f of the harmonic n ;

$DLF_n(2Hz)$ - dynamic load factor at pacing frequency 2Hz and corresponding phase shifts of the harmonic n found from Table II – IV of authors publication [48].

To check the method S.C.Kerr's [72] obtained results of the vertical force component DLF_i were compared with the new mean DLF_i values (for ascent (2Hz) and descent (2.15Hz) cases) and found to be in a very good agreement for the first harmonics (Fig.5). Results of the second harmonics slightly differ and it correlates with the proposition of Davis [29] to take a higher value for the second harmonic. Kerr's data for the second harmonic has a very significant scatter and the mean value does not depend on the walking pace (stair descending case) which seems to be quite unrealistic.

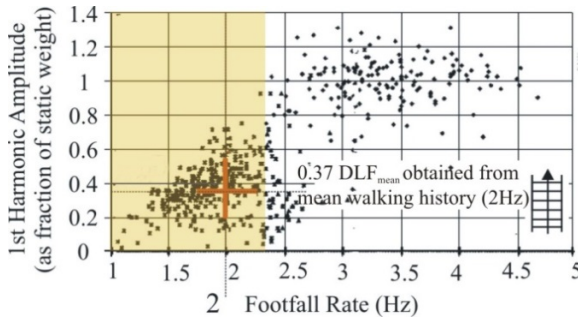


Fig. 5. First harmonic values for ascending the stairs
(comparison with Kerr's data)

Fig. 6a and Fig. 6b that are obtained from the mean walking force history reveals the differences between the process of stair ascending and descending process.

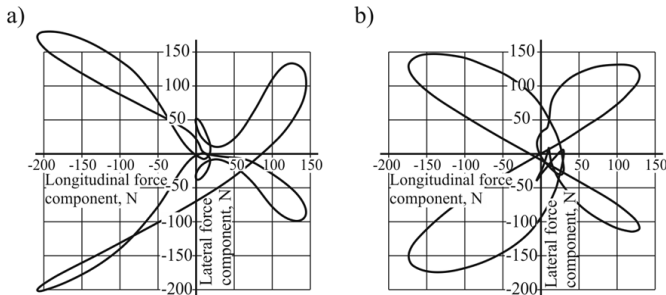


Fig. 6. Path of the mean pedestrian force vector end point: a) ascending case at rate of 2Hz; b) descending case at rate of 2,15Hz

It is found that the minimum number of harmonics to obtain approximate replication of the real walking force time history for vertical, longitudinal and lateral directions is three. Those are harmonics with DLF's above 0.05. In the case of vertical and longitudinal directions it should be taken first three harmonics, but for a lateral direction it should be first, third and fifth harmonic.

The main advantages of using the presented method are following:

- Possibility to estimate continuous human – induced forces of different actions applied to the structure under a wide range of the conditions due to the non-laboratory restrictions;
- Measurement devices do not have strong influence on human ability to move naturally;
- Requirement of low cost instruments: few accelerometers that are capable of storing and downloading data for relatively small time intervals;
- Allows to obtain not only dynamic load factors but also the phase shift values associated with the mean walking history;
- Obtained analytical mean function contains information about the imperfections of person's footfalls and differences between the continuous walking histories but is still a deterministic force model. Unlike probabilistic force models it is more convenient to handle, when performing analytical or numerical calculations of the structure under consideration.

3. Research on human induced vibrations of lattice light-weight towers

This section of thesis covers the experimental and theoretical investigations of the light-weight lattice public observation towers dynamic parameters and responses to the different human induced loading conditions.

It is important to understand the typical dynamic behavior of the existing observation towers to be able to develop the methodology of tower response calculations to human induced loads. Therefore experimental investigations to find the typical dynamic parameters of existing lattice observation towers have been carried out, as well as theoretical and experimental investigations of application and structure response to the human induced loads obtained in previous section of thesis.

During the experiments the vibration accelerations of 19 observation towers in Latvia were measured but further for the dynamic analysis 12 observation towers that are in satisfactory technical condition were taken (no major defects found by visual inspection). The typical geometrical and dynamic parameters as well the response level of inspected towers are summarized in Table 2. Post processing of the experimental data was done by using the signal theory.

Table 2

Typical geometrical and dynamic parameters of the inspected light-weight lattice towers in Latvia (summary)

Typical parameter range	Timber structure	Steel structure
Height	19 – 34 m	20 – 36.5 m
Plan dimension on the ground level	4.8 – 9.4 m	1.5* – 9.5 m
Fundamental frequency	1.2 – 1.6 Hz	0.8 – 2.6 Hz
Damping ratio	3.1% – 3.85 %	≈1%** 1.7% – 2.7%
Max response to visitors movement (acceleration)	0.15 – 0.4 m/s ²	0.2 – 0.5 m/s ²

* – main lateral load resisting system

** – fully welded structure

Under miscellaneous conditions measured accelerations of the structures (also used for the dynamic parameters extraction) reveal that the highest

dynamic response of the tower can be reached at normal exploitation conditions when a compact group of visitors descends the structure (Fig. 7).

In this part of the research from experimental results it is concluded that the lightweight slender vertical structures like sightseeing towers with their natural frequencies close to human walking frequencies experiences vibrations in its resonance modes. Unlike the bridge structures where lateral sway is caused by a human walking lateral force component, the tower type structure vibration is caused by a human walking lateral and longitudinal force component. The human movement on the stairs and tower response is not entirely (no linear relationship) connected with the number of the individuals using the structure.

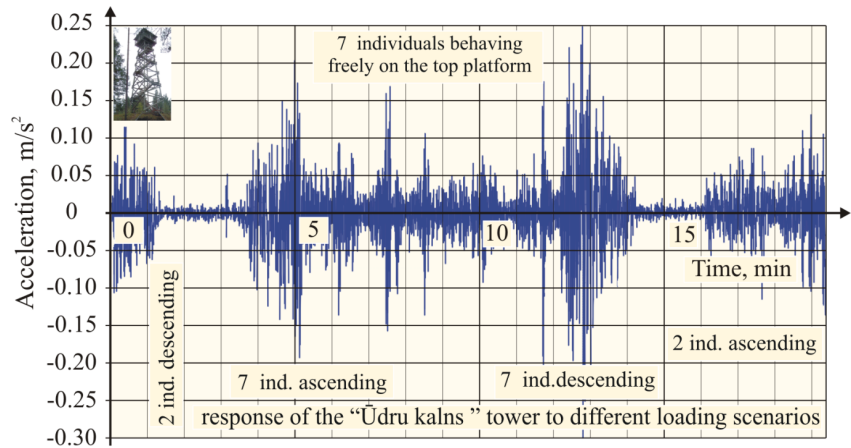


Fig. 7. Example of tower response to different loading scenarios

The observation tower in Dzintari (steel structure with eccentric configuration) was chosen for the additional experiment that aimed to identify the importance of human walking frequency synchronization with the natural frequency of the tower by comparing the human walking ground reaction force harmonic frequencies with the frequencies of the tower at its maximum response. It was concluded that human and structure synchronization has more an accidental nature and human induced loading itself has a stochastic nature.

Based on the visitor’s subjective assessment of the vibration level of all inspected towers the preliminary curve - the peak acceleration limit ensuring maximum comfort level of visitors is proposed. The curve can be further modified by factors that takes into account the type, site of particular structure and required comfort level or other factors. On the graph (Fig. 8) there are plotted experimental values of different towers when visitors experienced some

degree of discomfort as well as typical frequency ranges of the walking harmonics.

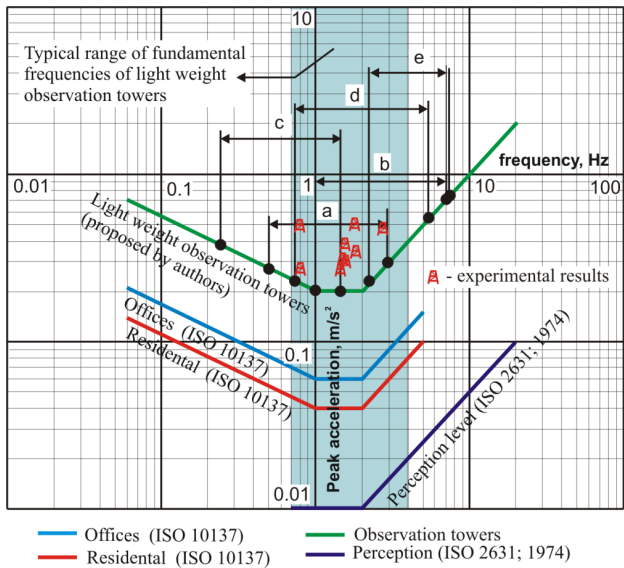


Fig. 8. Comfort criteria (for “a” to “e” see Table 3)

Table 3

Typical frequencies range of harmonics due to ascending or descending the stair

Frequency range title	Frequency f_1 , Hz
1 st harmonic of force longitudinal component (a)	$0.5 \leq f_1 \leq 3$
2 nd harmonic of force longitudinal component (b)	$1 \leq 2f_1 \leq 6$
1 st harmonic of force lateral component (c)	$0.25 \leq f_1/2 \leq 1.5$
3 rd harmonic of force lateral component (d)	$0.75 \leq 3f_1/2 \leq 4.5$
5 th harmonic of force lateral component (e)	$1.25 \leq 5f_1/2 \leq 7.5$

where f_1 is pacing frequency

Further particular attention is paid to observation tower response to the different walking harmonics and response calculations to group loading.

The slender observation towers are the line-like structures and for the purpose of response analysis are modeled as the cantilever with uniformly distributed mass along the height (Fig. 9).

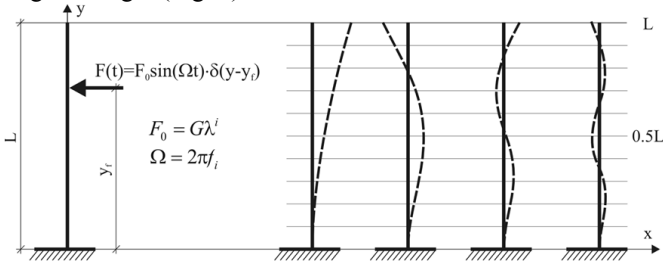


Fig. 9. Calculation scheme and mode shapes

G - static weight of the subject body; λ^i - the Fourier coefficient of the harmonic (DLF); f_i - human walking frequency of the harmonic; L - height of the tower

Response of the system with viscous damping to induced harmonic excitation written in the form of a well-known non-homogenous differential equation (12):

$$\frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = F(y, t) \quad (12)$$

The considerable discrepancies of experimentally obtained data and calculated values with usual assumption that structure reaches steady state vibrations, demonstrates that a tower does not reach this state of vibration due to the inconsistent periodicity of applied loading and its direction therefore it should be taken into account.

The obtained solution (13) of the equation of motion (12) e.g. displacement if initial conditions are zero and viscous damping considered includes the first part of vibrations when steady state has not been reached yet:

$$x(y, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Phi_i(y) Q_0^i}{m \omega_i} \left[\frac{\bar{\omega}_i (p_1^i \sin \Omega t - 2 \xi_i^i \Omega \cos \Omega t) + \Omega (p_2^i \sin \bar{\omega}_i t + 2 \xi_i^i \bar{\omega}_i \cos \bar{\omega}_i t) e^{-\xi_i^i t}}{D} \right] \quad (13)$$

where:

$$p_1 = \bar{\omega}_i^2 + \xi_i^2 - \Omega^2; \quad (14)$$

$$p_2 = \Omega^2 + \xi_i^2 - \bar{\omega}_i^2; \quad (15)$$

$$D = (\xi_i^2 + \Omega^2 + \bar{\omega}_i^2)^2 - 4 \Omega^2 \bar{\omega}_i^2. \quad (16)$$

ξ - damping ratio;

Φ_n - mode shape;

m - mass of the structure per meter length, kg/m;

ω_n - tower natural angular frequency, rad/s;

Q^i / m - modal mass.

For non-homogenous differential equations like (12) with constant coefficients the particular solution may be found separately for each function on the right side of the equation. Therefore the maximum response from each of the walking harmonics might be found from equations (13), and then summed together for obtaining the total response of the structure after the interested number of “successful footfalls” (expressed as a time moment):

$$\begin{aligned}
 & \frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = G\lambda_1 \sin(\Omega_1 t + \delta_1) \\
 & + \\
 & \frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = G\lambda_2 \sin(\Omega_2 t + \delta_2) \\
 & + \\
 & \dots \\
 & + \\
 & \frac{\delta^2}{\delta y^2} \left[EI(y) \frac{\delta^2 x}{\delta y^2} \right] + m(y) \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c(y) \frac{\delta x}{\delta t} = G\lambda_n \sin(\Omega_n t + \delta_n), \quad (17)
 \end{aligned}$$

where:

λ_i - dynamic load factor (DLF) of walking harmonic i ;

n - number of walking harmonic considered;

δ_n - phase shift of the walking harmonic considered.

Various walking harmonic inputs to the total vibration greatly depend on the fundamental frequency of the structure. The most common case as an example when first harmonic longitudinal component coincides with the fundamental frequency of structure is presented in Fig. 10.

The case, when one of the walking harmonics is close to the one of the towers natural frequencies, has a stochastic nature. An almost complete conjunction for a longer period of time would have a minor probability due to the fact that individuals walking upstairs or downstairs vary the speed. Besides, stair has a turns that influences the pacing rhythm.

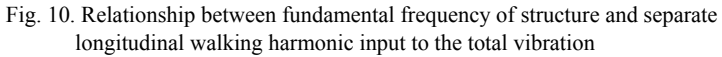


Figure 10 is a line graph showing the average acceleration in resonance with the 1st mode shape. The y-axis represents acceleration in m/s^2 , ranging from 0 to 0.8. The x-axis represents the normalized frequency Ω/ω_n , ranging from 0 to 2.5. The graph displays several curves corresponding to different numbers of successful footsteps (n) and different average acceleration ranges. A shaded region indicates the range of standard deviation. An inset diagram shows a person standing on a platform with dimensions 2.5 m and 25 m, and parameters $\omega_n = 1.68 \text{ Hz}$, $m = 960 \text{ kg/m}$, $F(t) = 162.8 \sin \Omega t$, $\text{DLF} = 0.11$, $G = 740 \text{ N}$, and 2 persons.

Legend for average acceleration ranges (m/s^2):

- 0.31-0.32 (Blue circle)
- 0.29 (Red circle)
- 0.26 (Green circle)
- 0.21 (Brown circle)
- 0.12 (Light blue circle)

Legend for number of successful footsteps (n) and damping ratio (ξ):

- $n=10, \xi=0.02$ (Dark blue line)
- $n=10, \xi=0.01$ (Red line)
- $n=8, \xi=0.02$ (Green line)
- $n=6, \xi=0.02$ (Brown line)
- $n=4, \xi=0.02$ (Light blue line)
- $n=2, \xi=0.02$ (Dark blue line)

Inset diagram parameters:

- Platform dimensions: 2.5 m (width), 25 m (height)
- Frequency: $\omega_n = 1.68 \text{ Hz}$
- Mass: $m = 960 \text{ kg/m}$
- Force: $F(t) = 162.8 \sin \Omega t$
- Dynamic Load Factor: $\text{DLF} = 0.11$
- Weight: $G = 740 \text{ N}$
- Persons: 2

Fig. 11. An example of tower response at different frequency ratios

To take into account possible variation in ratio between relevant walking harmonic and excited natural frequency of the structure it is suggested to calculate the mean value of the tower response for the selected number of steps in ratio range of $1 \pm 20\%$ (based on the experimental results).

From the experimental part of the investigation it is clear that the relationship between the number of tower visitors in the group and structure dynamic response to this excitation will not rise linear. Although it is very likely that individuals in the group would have the same walking speed when following each other, phases between steps would differ. The idealized equivalent number of persons that fully synchronize their steps is a convenient way to deal with this loading in structural design calculations.

Therefore the random number generator built in the Mathcad software is utilized to simulate stochastic property of phase shift redistribution for different number of individuals in the group in order to find the equivalent number of persons H_{eq} in the considered direction. The performed number of simulations is $n = 10^5$ for the groups of 2 to 20 persons. The simulation example for group of 8 persons is presented in Fig. 12 a).

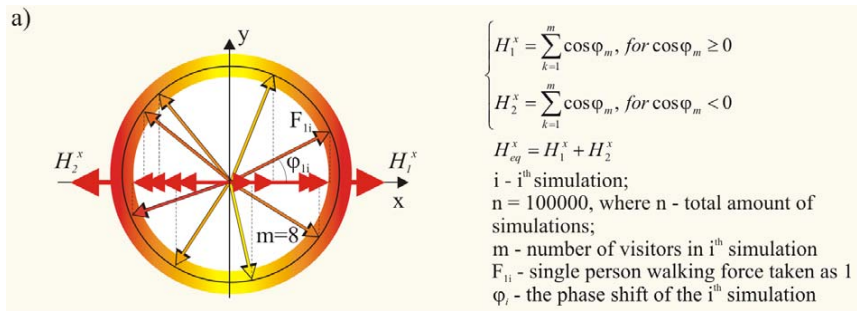


Fig. 12 a). Scheme of the calculation for simulation example of the phase shift redistribution between individuals

As a result the obtained relationship between number of people m in the group and the equivalent number of visitors approximated by equations for intended probability of H_{eq} not being exceeded 95% (18) and 90% (19) accordingly:

$$H_{eq}^{95\%} = 0.001m^3 - 0.0353m^2 + 0.6249m + 0.845 \quad (18)$$

$$H_{eq}^{90\%} = -0.0035m^2 + 0.2831m + 1.3419 \quad (19)$$

The example of density function of the equivalent number of persons for a group of 8 visitors and relationship between number of persons in the group and equivalent number of visitors are presented in Fig. 12 b) and c).

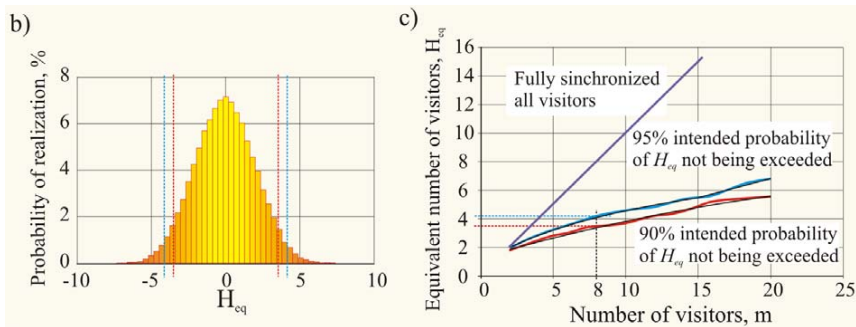


Fig. 12 b) density function of the equivalent number of persons in group of 8; c) relationship between number of persons in the group and equivalent number of visitors H_{eq}

The obtained relationships $r_{90\%} = H_{eq}^{\text{visitors in the group}} / H_{eq}^{\text{visitors in the group}}$ correlate very well with the data from the experimental part of the research. A comparison between theoretical and experimental results for two timber and two steel towers is presented in Table 4.

Table 4

Comparison of theoretical and experimental results

Tower name	Sizes of groups considered	Theoretical results of ratio with intended probability		Experimental results of ratio, r_a	Difference, %	
		$r_{90\%}$	$r_{95\%}$		$\frac{r_{90\%} - r_a}{r_{90\%}} \cdot 100\%$	$\frac{r_{95\%} - r_a}{r_{95\%}} \cdot 100\%$
Ūdru k.	7 & 2	1.67	1.95	$0.25/0.15 = 1.7$	-1.8	12.8
Priedaine	3 & 2	1.24	1.14	$0.21/0.15 = 1.4$	-12.9	-22.8
Dzintari	11 & 7	1.28	1.25	$0.48/0.39 = 1.23$	3.9	1.6
Kalsnava	9 & 2	1.9	2.21	$0.19/0.1 = 1.9$	0	14.0

Based on the experimental and theoretical investigations of thesis in the algorithm of the methodology for calculation of maximum response of structure to typical human induced loads is presented. The given procedure can be used to determine whether the designed lattice observation tower fulfills the serviceability requirement: an acceptable comfort level of users of the structure.

The peak acceleration mean value can be calculated according to the equation (20):

$$a_{mean} = 2,5 \int_{0,8}^{1,2} a_{max}(z) d(z), \quad (20)$$

where

a_{mean} - mean peak acceleration, m/s²;

$a_{max}(z)$ - peak acceleration at time t , m/s²;

$z=W/w_i$ - the ratio between relevant walking harmonic and the excited natural frequency;

$t=2pn/w_i$ - time after n subsequent “successive” steps, s;

As a verification of developed methodology and also practical guide for the peak acceleration calculation of lattice observation tower response to human induced loads the analytical calculation example of timber tower (Example 1) and numerical calculation example of steel tower (Example 2) are presented in thesis.

4. Conclusions

Within the thesis the experimentally obtained human movement induced dynamic loads are studied and based on that the calculation methodology for assessment of light-weight lattice self-supporting tower type structure dynamic response to those typical human induced dynamic loads is developed as well as a limit is set on the observation tower vibration acceleration amplitudes due to the comfort criteria of tower visitors.

As the final summary of the present study the following conclusions are drawn:

- The proposed method of obtaining dynamic forces from human movement, based on kinematics of the motion of human center of gravity (COG), eliminates one of the most important drawbacks of the traditional methods – an influence on human ability to move naturally that has significant effect on character and magnitudes of human induced dynamic forces;
- The proposed experimental data processing method for obtaining the mean continuous walking force histories, based on the averaging between continuous walking histories itself, allows to find not only the mean dynamic load factors (DLF) but also the phase shift values associated with the mean walking force history and therefore allows to obtain analytical expression of human induced dynamic force components;
- For the first time experimentally obtained the mean dynamic load factors and corresponding phase shifts of a person while stair ascent or descent at different pacing frequencies (for Table A.4. of International Standard ISO 10137:2007) reveals that lateral and longitudinal direction force amplitudes strongly depend on the walking pace only in case of the stair ascent. In the case of stair descent, DLF values can be considered as constant when the pacing rate is changed. Descent of stairs creates 14% higher vertical amplitudes than ascent. In order to approximate replication of the real walking force time history for vertical, longitudinal and lateral directions a minimum of three harmonics must be used: 1st, 2nd and 3rd for the vertical and longitudinal direction and 1st, 3rd and 5th for the lateral direction;
- The vertical light-weight cantilever type structures such as public observation towers with fundamental frequency less than 3.3 Hz,

stiffness of structure less than $EI \leq 2 \cdot 10^6 L^{2.968}$ and self-weight less than $m \leq 206241 \cdot L^{-1.032}$ may undergo vibrations induced by human activities that do not satisfy the serviceability limit criteria – required comfort criteria during the structure exploitation. The lattice tower does not reach the steady state vibrations due to inconsistent periodicity of the applied loading and its changing direction. The highest response of the tower can be reached when a compact group of visitors descend the structure. The occurrence, when one of the walking harmonics is close to the natural frequency of the structure, has a stochastic nature. The stochastic nature of the group loading might be taken into account with theoretically obtained equation of a non-linear relationship between the real number of visitors in the group and the idealized equivalent number of persons. The separate walking harmonic input to the total vibration of the structure depends on the fundamental frequency of the structure. For structures with fundamental frequency above 2 Hz only one harmonic input is dominant;

- The proposed preliminary curve - the peak acceleration limit ensuring maximum comfort level of visitors, based on the visitor's subjective assessment of vibration level of all inspected towers and other researchers' findings about human tolerance to vibrations reveal that allowable acceleration limit is around 3.3 times higher than the one of high-rise office buildings where such limitation is set in the building codes;
- The developed algorithm based on the performed experimental and theoretical investigations allows to calculate the maximum dynamic response of structure to typical human induced loads. Depending on the degree of pacing synchronization among visitors agreement between theoretically and experimentally obtained results of the structures maximum response to the stochastic time varying human induced loads are in the range of 0 to 25% which serves as a verification of the developed methodology.

PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES /

LIST OF REFERENCES OF THE THESIS

1. Alexander R.M. Principles of animal locomotion.- Princeton University Press: Princeton, New Jersey, USA, 2003.
2. Amiri G., Massah S. R. Seismic response of 4-legged self – supporting telecommunication towers // IJE Transactions B: Applications, 2002, Vol. 20, No. 2, August 2007.
3. Amin, T., Hatzinakos D. Determinants in human gait recognition // Proceedings from 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering: Vision for a Greener Future, CCECE 2012, Montreal, 2012, pp. 1-4.
4. Appendix C, Vibration Serviceability Requirements for Foot Cycle Track Bridges / British Standards Institution. London: BSI, 1978. BS 5400, Part 2.
5. Augusti G., Bartoli G., Borri C., Gusella V., Spinelli P. Wind load and response of broadcasting antennas: Three years of research work in cooperation with RAI // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, Vol. 43, Part 3, pp. 2077-2088.
6. Australian Standard. AS 3995 – 1994: Design of Steel Lattice Towers and Masts, Standards Australia, Sydney, Australia.
7. Ayyappa E. Normal human locomotion, part 1: basic concepts and terminology // Journal of Prosthetics and Orthotics, 1997, Vol. 9, pp. 1-10.
8. Bachman H., Ammann W. Vibration in Structures Induced by Man and Machines // Structural Engineering Document 3e, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Ch. 2: Man Induced Vibrations, Appendix A: Case Reports, 1987.
9. Bachmann H., Vibration Problems in Structures, Birkhauser, Basel: Boston, Berlin, 1995.
10. Barker C. Some observations on the nature of the mechanism that drives the self – excited lateral response of footbridges // Proceedings of the First International Conference Footbridge 2002. Paris, 20-22 November, 2002.
11. Bartlett R. Introduction to Sports Biomechanics. Great Britain: Alden Press, 1977, 289 p.
12. Baumann K., Bachmann H. Dynamic Loads Caused by Humans and their Effect on Beam Structures // Institute of Structural Engineering (IBK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 1988.
13. Beely F., Zur Mechanik des Stehens. Über die Bedeutung des Fussgewolbes beim Stehen // Langenbecks Archiv für Klinische Chirurgie, 1882, 27, pp. 457.
14. Bishop N.W.M., Willford M., Pumphrey R. Human induced loading of flexible staircases // Safety Science, 1995, Vol. 18, pp. 261–276.
15. Blaise N., Denoël V. Principal static wind loads // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, vol. 113, pp. 29-39.
16. Blanchard J., Davies B.L., Smith J.W. Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges // Proceedings of the DOE and DOTRRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges, Crowthorne, UK, May 1977.

17. Bocian M., Macdonald J. H. G., Burn J. F., Redmill D. A novel experimental setup for the identification of human actions on lateral oscillating structures // *Proceedings of 11th International Conference on Recent Advances of Structural Dynamics*, Pisa, 1-3 July, 2013.
18. Bougard A. Human loading on staircases // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings*, 2002, 152, No 4, pp. 371–380.
19. Brownjohn J., Fok P., Roche M., Omenzetter P. Long span steel pedestrian bridge at Singapore Changi airport – part 2: crowd loading tests and vibration mitigation measures, Crowd dynamic loading on footbridges // *The Structural Engineer*, 2004, 82 (16), pp. 28-34.
20. Brownjohn J.M.W., Pavic A., Omenzetter P. A spectral density approach for modeling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking // *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2004, Vol. 31, No. 1, pp. 65-77.
21. Buchholdt H. A., Nejad S. E. M. *Structural Dynamics for Engineers*. London: ICE Publishing, 2012.
22. Butz C., Feldmann M. and et.al. Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimized design guidelines for steel footbridges / *European Commission, Research Fund for Coal and Steel, Tech. Rep, European Communities*, 2008.
23. Cappozzo A., Leardini A., et.al. Human movement analysis using stereo-photogrammetry. Part 1: theoretical background // *Gait & Posture*, 2005, Vol. 21, pp. 186-196.
24. Catbas F. C., Gul M., Sazak H. O. Dynamic Testing and Analysis of a Football Stadium // *Dynamics of Civil Structures, Proceedings of the IMAC - XXVIII*. Florida USA, Jacksonville, 2010. Vol. 4, pp. 195-203.
25. Charles, P.; Bui, V. Transversal dynamic actions of pedestrians & Synchronisation // *Proceedings of Footbridge 2005 – 2nd International Conference*, Venice, 2005.
26. Clarke T.E., Frederick E.C., Cooper L.B. Effect of shoe cushioning upon ground reaction forces in running // *International Journal of Sports Medicine*, 1983 (4), pp. 247–251.
27. Cunha A., Caetano E., et.al. The role of dynamic testing in design, construction and long – term monitoring of lively footbridges // *Proceedings of 3rd International Footbridge Conference*, Portugal, Porto, 2008.
28. Dallard P., Fitzpatrick T., Flint A. The London Millennium footbridge // *The Structural Engineer*, 2001 (79), pp. 17–33.
29. Davis B., Murray T M. Slender Monumental Stair Vibration Serviceability // *Journal of Architectural Engineering*, 2009, December, pp. 111–121.
30. Design of Footbridges. Background Document. Human induced Vibrations of Steel Structures. Report RFS2-CT-2007-00033, 2007.
31. DeWitt J.K., Cromwell R.L., Hagan R.D. The effect of manipulating subject mass on ground reaction force during locomotion // *American Society of Biomechanics Annual Meeting*, Blacksburg, USA, September 2006.
32. Dingwell J.B., Davis B.L. A rehabilitation treadmill with software for providing real-time gait analysis and visual feedback // *Journal of Biomechanical Engineering*, 1996 (118), pp. 253–255.

33. Donelan J.M., Kram R., Kuo A.D. Mechanical and metabolic determinants of the preferred step width in human walking // *Proceedings of the Royal Society B*, 2001 (268), pp. 1985–1992.
34. Dumas R, Cheze L., Verriest J. P. Adjustments to McConville et. al. and Young et.al. body segment inertial parameters // *Journal of Biomechanics*, 2006, ol. 40, pp. 543-553.
35. Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action: Recommendations for management, design and assessment/ Dougill J. W., Blakeborough A., Cooper P., et.al. London: Institution of Structural Engineers, 2008, pp. 54.
36. Edington K.A., Guler H. C., et.al. Instrumented treadmills: reducing the need for gait labs, USA, 2008.
37. Eriksson P.E. Vibration of Low-frequency Floors - Dynamic Forces and Response Prediction. PhD Thesis. Unit for Dynamics in Design, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1994.
38. Eurocode 0. Eurocode - Basis of Structural Design. EN 1990.
39. Eurocode 1. Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. LVS EN 1991-1-4:2005/A1:2010.
40. Eurocode 3. Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys - Towers and masts. LVS EN 1993-3-1:2007.
41. Feldmann M., Heynemeyer Ch., Butz Chr., et. al. Design of floor structures for human induced vibrations // JRC Scientific and Technical Report. 2009. EUR 24084EN, 64 p.
42. Franck L. Synchronous Lateral Excitation of Footbridges. Swiss Federal Institute of Technology, Swiss, 2009, 5 p.
43. Fritz M., Peikenkamp K. Simulation of the influence of surfaces on measured vertical ground reaction forces during fast movements. *Human Factors in the Age of Virtual Reality*, Shaker Publishing: Maastricht, Netherlands, 2003, pp. 233–235.
44. Fujino Y., Pacheco B.M., Nakamura S. & Warnitchai P. Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993. Vol. 22, No. 9, pp. 741-758.
45. Galvez C. Static method for aseismic design of self – supporting towers // Project Report G95-08, Dept. of Civil Eng. And Applied Mechanics, McGill University. Montreal, Quebec, Canada, 1995.
46. Gaile L., Radinsh I. Analysis of Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia // *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources"*, Latvia, Rezekne, 20-22 Jun, 2013, pp. 57-62.
47. Gaile L., Radinsh I. Eccentric lattice tower response to human induced dynamic loads // *19th International Congress on Sound and Vibration 2012, ICSV 2012*, pp. 1139-1146.
48. Gaile L., Radinsh I. Human Induced Dynamic Loading on Stairs // *Proceedings of International Conference on Civil and Construction (ICSCE 2012)*, Stockholm, 2012: Issue 67, pp. 626-632.

49. Gaile L., Radinsh I. Lattice tower dynamic performance under human induced dynamic loading // RASD 2013 11th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, 2013, Italy, Piza, 1st – 3rd July, 2013, pp.1-15.
50. Gard S.A., Miff S.C., Kuo A.D. Comparison of kinematic and kinetic methods for computing the vertical motion of the body center of mass during walking // Human Movement Science, 2004 (22), pp. 597–610.
51. Giakas G., Bultzopoulos V. A comparison of automatic filtering techniques applied to biomechanical walking data // Journal of Biomechanics, 1997 (30), pp. 847–850.
52. Gordon B. An Introduction to Structural Dynamic Comfort Criteria. Information paper IP 21/12, IHS BRE: UK, 2012.
53. Gordon D., Robertson E. 2004. Research methods in biomechanics. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, USA, 2004.
54. Griffin M. J. Handbook of Human Vibration. Elsevier Ltd., 2004
55. Gronley J.K., Perry J. Gait analysis techniques // Physical Therapy, 1984 (63), pp.1831-1838.
56. Hamill J., McNiven S. L. Reliability of selected ground reaction force parameters during walking // Human Movement Science, 1990 Vol. 9, pp. 117–131.
57. Hamill J., Selbie W.S. Three-dimensional kinetics. Robertson D.G.E., Caldwell D.W., Hamill J., Kamen G., Whittlesey S.N. (Eds.), Research Methods in Biomechanics, Human Kinetics, Champaign: IL, USA, 2004.
58. Heinemeyer C., Butz C., Keil A. et. al. Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations // Office for Official Publications of the European Communities, EUR 23984 EN. Luxembourg, 2009, pp. 84.
59. Heylen W., Lammens S. and Sas P. Modal analysis theory and testing. Leuven, Katholieke Universiteit Leuven, 2007.
60. He J., Fu Z. Modal Analysis. Butterworth –Heinemann, 2001, pp. 291.
61. Holmes J. D. Along wind response of lattice towers: Part I –Derivation of expressions for gust response factors // Engineering Structures, 1996, Vol. 18(4), pp. 287-292.
62. Holmes J. D. Along wind response of lattice towers: Part II – Aerodynamic damping and deflections // Engineering Structures, 1996., Vol. 18(7), pp. 483-488.
63. IASS. Recommendations for the Design and Analysis of Lattice Towers. International Association for Shell and Spatial Structures Working Group 4. Madrid, Spain, 1991.
64. Ingólfsson E.T., Georgakis C.T. A stochastic load model for pedestrian-induced lateral forces on footbridges // Engineering Structures, 2011, Vol. 33, No. 12, pp. 3454-3470.
65. Ingólfsson E. T., Georgakis C. T. Experimental identification of pedestrian – induced lateral forces on footbridges // Journal of Sound and Vibration, 2011, Vol. 330, pp.1265-1284.
66. Ingólfsson E. T., Gudmundsson G.V., Živanovic S., Pavic A. Crowd. Induced Vibrations of a Steel Footbridge in Reykjavik // Proceedings of the 30th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, Topics on the Dynamics of Civil Structures, 2012, Volume 1 (26), pp. 61-72.

67. ISO 10137:2007, Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration, International Standard Organization, 2007.
68. Kasperski M., Czwikla B. A Refined Model for Human Induced Loads on Stairs // Conference proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Topics on the Dynamics of Civil Structures, Proulx, Tomson Edition, 2011, pp. 27-39.
69. Kasperski M., Czwikla B. Men – induced loads on stairs // Proc. 8th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2011, Leuven, Belgium, 2011, pp.949–956.
70. Kavanagh J. J., Menz H., B. Accelerometry: A technique for quantifying movement // Gait & Posture, 2008, Vol. 28, pp. 1-15.
71. Kavanagh J.J., Morrison S., James D.A., Barrett, R. Reliability of segmental accelerations measured using a new wireless gait analysis system // Journal of Biomechanics, 2006, Vol. 39, No. 15, pp. 2863-2872.
72. Kerr S. C., Bishop N. W. M. Human induced loading on flexible staircases // Engineering Structures, 2001, Vol. 23, pp. 37–45.
73. Khedr M. A. Seismic Analysis of Lattice Towers // Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, 1998, pp.242.
74. Khedr M. A. McClure G. Earthquake amplification factors for self-supporting telecommunication towers // Canadian Journal of Civil Engineering. 1999, 26(2), pp.208-215.
75. Kretz T., Grunebohm A., Kessel A. et. al., Upstairs Walking Speed Distributions on a Long Stairway // Safety Science, 2008, Vol 46, pp. 72-78.
76. Lafortune M.A., Three-dimensional acceleration of the tibia during walking and running // Journal of Biomechanics, 1991, Vol. 24, No. 10, pp. 877-879 + 881-886.
77. Lattice Towers and Masts. Part 4: Code of Practice for Lattice Masts / British Standards Institution. London: BSI, 1994. BS 8100, Part 4.
78. Leardini A., Chiari. et. al. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation // Gait & Posture, 2005, Vol.21(2), pp. 212-25.
79. Li H., Georgakis C. T, Chen Z. Q. The response spectrum methodology considering inter - and intra - subject variability // Proceedings of The 4th International Conference Footbridge 2011, Wroclaw, Poland, July 6-8, 2011.
80. Macdonald J. Pedestrian – induced vibrations of the Clifton Suspension bridge // Proceedings of the ICE – Bridge Engineering, UK, 1 June 2008, Vol. 161, Issue 2, pp.69-77.
81. Madugula M. K. S. Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts. USA, American Society of Structural Engineers, 2002. pp. 257.
82. McClure G., Galvez C. A. Zaugg S. Equivalent static load method for seismic analysis of lattice telecommunication towers // Proceedings of ASCE Structures Congress XV, April 13-16. Portland, Oregon, 1997, pp. 539-543.
83. McMahon T.A., Valiant G., Frederick E.C. Groucho running // Journal of Applied Physiology, 1987 (62), pp. 2326–2337.

84. McRobie A., Morgenthal G., Lasenby J., Ringer M. Section model tests on human-structure lock-in // *Bridge Engineering*, 2003 (156), pp. 71–79.
85. Melderis I., Teteris G. *Būvmehānika, Izdevniecība Zvaigzne, Rīga*, 1977.
86. Mendis P., Ngo T., Haritos N., Hira A. Wind Loading on Tall Buildings // *EJSE Special Issue: Loading on Structures*, 2007, pp. 41-54.
87. Mikus J. Seismic analysis of self – supporting telecommunication towers // *Eng. Report G94-10*, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, 1994.
88. Mouring S.E. Dynamic Response of Floor Systems to Building Occupant Activities. PhD Thesis. The Johns Hopkins University, Baltimore, MD, 1993.
89. Mouring S.E., Ellingwood B.R. Guidelines to Minimize Floor Vibrations from Building Occupants // *Journal of structural engineering* New York, N.Y., 1994, Vol. 120, No. 2, pp. 507-526.
90. Murray T. M., Allen D. E., Ungar E. E. Floor vibration due to human activity // *AISC Design Guide*, American Institute of Steel Construction, Chicago, 1997.
91. Nurse M.A., Hulliger M., Wakeling J.M., Nigg B.M., Stefanyshyn D.J. Changing the texture of foot wear can alter gait patterns // *Journal of Electromyography and Kinesiology* , 2005 (15), pp. 496–506.
92. Pimentel R.L., *Vibrational Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads*. Ph. D. Thesis. University of Sheffield, UK, 1997.
93. Pizzimenti A. D., Ricciardelli F. Experimental evaluation of the dynamic lateral loading of footbridges by walking pedestrians // *Sixth European Conference on Structural Dynamics EUROLYN*, Paris, France, September 2005.
94. Racic V. *Experimental Measurements and Mathematical Modeling of Nearperiodic Human-induced Force Signals*, Ph. D. Thesis. University of Sheffield, UK, 2009.
95. Racic V., Pavic A, Brownjohn, J. M. W. Experimental identification and analytical modeling of human walking forces: Literature review // *Journal of Sound and Vibration*, 2009, Vol. 326, pp. 1–49.
96. Racic V., Pavic A, Brownjohn, J. M. W. Modern facilities for experimental measurement of dynamic loads induced by humans: A literature review // *Shock and Vibration*, 2013, 20(1), pp. 53-67.
97. Rainer J.H., Pernica G., Allen D.E. Dynamic loading and response of footbridges // *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1988, 15, pp. 66–71.
98. Rao S. S. *Vibration of Continuous Systems*. John Wiley & Sons: Hoboken, New Jersey, 2007.
99. *Recommendation for the Design and Analysis of Lattice Towers*. Second draft / International Association for Shell and Spatial Structures, Madrid, Spain, 1991.
100. Riener R., Rabuffetti M., Frigo C., Quintern J., Schmidt, G. Instrumented staircase for ground reaction measurement // *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1999, Vol. 37, No. 4, pp. 526-529.

101. Riener R., Rabuffetti M., Frigo C. Stair ascent and descent at different inclinations // *Gait and Posture*. 2002 (15), pp. 32–44.
102. Ronnquist A. Pedestrian Induced Lateral Vibrations of Slender Footbridges. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2005.
103. Sabatini A.M., Martelloni C., Scapellato S., Cavallo F. Assessment of walking features from foot inertial sensing // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2005, Vol. 52, No. 3, pp. 486-494.
104. Sachse R., Pavic A., Reynolds P. Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: A literature review // *Shock and Vibration Digest*, 2003, 35(1), pp. 3-18.
105. Sackmann V. Prediction of natural frequencies and mode shapes of self – supporting lattice telecommunication towers // Project Report – Diplomarbeit Nr. 76, (Technical University of Munich), Department of Civil Engineering, McGill University, Montreal, Canada, 1996, pp. 102.
106. Sartor C., Alderink G., Greenwald H., Elders L. Critical kinematic events occurring in the trunk during walking // *Human Movement Science*, 1999, Vol. 18, No. 5, pp. 669-679.
107. Schueller G. I. Past, Present & Future of Simulation – Based Structural Analysis // *Proceedings of the Euro SIBRAM 2002. Colloquium*. Prague, Czech Republic, 2002, Vol. 2, pp. 17-27.
108. Setareh M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings*, 2012, Vol. 165, Issue SB5, pp. 219-231.
109. Smith A.L., Hicks S. J., Devine. Design of Floors for Vibration. A New Approach (Revised Edition, February 2009). SCI Publication P354. Steel Construction Institute, UK, 2009.
110. Specification of USB Accelerometer Model X6-1A. Gulf Coast Data Concepts. November 2010, Rev G, 2010.
111. Stacoff A., Diezi C., Luder G., Stüssi E., Kramers-De Quervain I.A. Ground reaction forces on stairs: Effects of stair inclination and age // *Gait and Posture*, 2005, Vol. 21, No. 1, pp. 24-38.
112. Talukdar S. Vibration of Continuous Systems / Internet.-
<http://www.iitg.ernet.in/engfac/rtiwari/resume/lecture%20notes.html>.
113. Thorstensson A., Nilsson J., Carlson H., Zomlefer M.R. Trunk movements in human locomotion // *Acta Physiologica Scandinavica*, 1984, Vol. 121, No. 1, pp. 9-22.
114. Vaughan C. L., Davis B. L. O'Connor J. C. Dynamics of Human Gait, Cape Town, Kiboho Publishers, 1999.
115. Venkateswarlu B., Hari Krishna P., Selvi R. S, Satish R. K. Stochastic gust response of microwave lattice towers // *Computers and Structures*. 1994, 52(5), pp. 1031-1041.
116. Venuti F., Bruno L. Crowd-structure interaction in lively footbridges under synchronous lateral excitation: A literature review // *Physics of Life Reviews*, 2009. Vol. 6, No. 3, pp. 176-206.

117. Weidman P. Pinelis I. Model equations for the Eiffel Tower profile: Historical perspective and new results // *Comptes Rendus – Mecanique*. 2004, Vol. 332, No. 7, pp.571-584.
118. Willford M., Young P. A Design Guide For Footfall Induced Vibration of Structures // CCIP – 016, The Concrete Centre, Camberley, 2006.
119. Willford M., Young P., Field C. Predicting footfall-induced vibration: Part I // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings*, April 2007, Issue SB2, pp. 65-72.
120. Whittlesey S.N. Robertson D.G.E. Two-dimensional inverse dynamics. Robertson D.G.E., Caldwell G.E., Hamill J., Kamen G., Whittlesey S.N. (Eds.), *Research Methods in Biomechanics, HumanKinetics*, Champaign: IL, USA, 2004.
121. Winiarski S, Rutkowska – Kucharska A. Estimated ground reaction force in normal and pathological gait // *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 2009., Vol. 11, No. 1, pp. 54–60.
122. Wu G., van der Helm F. C. T., et. al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion – part II: shoulder, elbow, wrist and hand // *Journal of Biomechanics*, 2005, Vol. 38, pp. 981-982.
123. Wu G., Ladin Z. The study of kinematic transients in locomotion using the integrated kinematic sensor // *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 1996, Vol. 4, No. 3, pp. 193-200.
124. Xie W., He W., Ai K. Study on characteristics of pedestrian loads of railway station structures Gongcheng Lixue // *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12), pp. 256-264.
125. Yao S., Wright J.R., Pavic A., Reynolds P. Experimental study of human-induced dynamic forces due to jumping on a perceptibly moving structure // *Journal of Sound and Vibration*, 2006 (296), pp. 150–165.
126. Young P. Improved floor vibration prediction methodologies // *Proceedings of Arup Vibration Seminar on Engineering for Structural Vibration - Current Developments in Research and Practice*, London, UK, 2001.
127. Zhou B., Ren X., Lu X. Vibration Analysis and Evaluation of the Indoor Spiral Steel Stair // *Advanced Materials Research*, 2011. Vols. 163-167, pp. 36–43.
128. Zivanovic S., Pavic A. Probabilistic assessment of human response to footbridge vibration // *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2009, Vol. 28(4), pp. 255-268.
129. Zivanovic S., Pavic A., Reynolds P. Probability based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation // *Engineering Structures*, 2007, 29(6), pp. 942–954.
130. Živanović S., Pavic A., Reynolds P. Human-structure dynamic interaction in footbridges // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 2005, Vol. 158, No. 4, pp. 165-177.
131. Živanović S., Pavic A., Reynolds P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review // *Journal of Sound and Vibration*. 2005.-Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74.

132. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании, Москва, Стройиздат, 1988, 584 с.
133. Киселев В. А., Строительная механика, Специальный курс, Москва Стройиздат, 1980.
134. Конструкции из дерева и пластмасс Примеры расчета и конструирования: Учеб. пособие для вузов. Под ред. проф. Иванова В. А., 3-е изд., Киев, Вища школа, 1981, 392 с.
135. Карлсен Г.Г., Большаков В.В., Каган М.Е., Свенцицкий Г.В. Деревянные конструкции, Москва, Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.
136. Карлсен Г.Г., Большаков В.В., Коган М.Е. и др. Конструкции из дерева и пластмасс. Учебник для вузов. Москва, Стройиздат, 1975, 688 с.

Par promocijas darba autori

Līga Gaile ir dzimusi 1977. gada 5. augustā Rīgā, Latvijā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Būvniecības fakultātē 2003. gadā iegūts zinātņu bakalaura grāds būvniecībā, bet 2006. gadā iegūts profesionālā maģistra grāds būvniecībā (Mg.Sc.Eng.) un būvinženiera kvalifikācija.

L.Gaile ir Latvijas standartizācijas iestādes Eirokodeksu tehniskās apakškomitejas vadītāja, viena no Latvijas Būvkonstrukciju projektētāju asociācijas dibinātājām, kā arī Latvijas Būvinženieru savienības locekle, Latvijā sertificēta inženiere. Pašreizējā darbavieta ir docente RTU Būvmehānikas katedrā.

About the Author

Līga Gaile was born in Riga, Latvia on 5th of August 1977. She acquired Professional Master's degree in Civil Engineering (Mg.Sc.Eng.), as well as an engineer's qualification in Civil Engineering at the Riga Technical University, Department of Structural Engineering in 2006 and Bachelor of Science degree in Civil Engineering at the Riga Technical University (RTU), Department of Structural Engineering in 2003.

Mrs. Gaile is a Head of the Eurocode technical subcommittee of Latvia, one of the founders of the Latvian Association of Structural Engineers and a member of the Latvian Association of Civil Engineers, chartered engineer in Latvia. She currently works as a docent at RTU, Department of Structural Mechanics.

APSTIPRINĀJUMS / CONFIRMATION

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.

I certify that the thesis I have presented for obtaining the doctor degree of engineering science of the Riga Technical University is my own work. The thesis has not been submitted to any other university for obtaining the scientific degree.

Līga GAILE(Paraksts / signature)

Datums / date:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 82 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 135 lappuses. Literatūras sarakstā ir 136 nosaukumi.

The thesis has been written in English. It contains introduction, 3 chapters, conclusion and bibliography, 82 figures and illustrations, in total 135 pages. There are 136 references in bibliography.