



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Eduards Skuķis

VIBRĀCIJAS KORELĀCIJAS TEHNIKA CILINDRISKO KONSTRUKCIJU NESTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANĀ

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte

Materiālu un konstrukciju institūts

Eduards Skuķis

Būvniecības inženierzinātņu programmas doktorants

**VIBRĀCIJAS KORELĀCIJAS TEHNIKA
CILINDRISKO KONSTRUKCIJU
NESTSPĒJAS NOVĒRTĒŠANĀ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing.

KASPARS KALNIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Skuķis, E. Vibrācijas korelācijas tehnika
cilindrisko konstrukciju nestspējas novērtēšanā.
Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU, 2023.
36 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-
06” 2022. gada 16. septembra lēmumu,
protokols Nr. L-5.

<https://doi.org/10.7250/9789934228681>
ISBN 978-9934-22-868-1 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 17. martā plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, 6A Ķīpsalas ielā, 342. kabinetā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Dmitrijs Serdjuks,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors *Dr. sc. ing.* Haims Abramovičs,
Technion – Izraēlas Tehnoloģiju institūts, Izraēla

Profesore *Ph.D. Chiara Bisagni*,
Delftas Tehnoloģiju universitāte, Nīderlande

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Eduards Skuķis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā. Tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, 21 attēls, kopējais lappušu skaits ir 118, skaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 64 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
1. Pamatojums	6
1.1. Promocijas darba mērķis	7
1.2. Aizstāvamās tēzes	7
1.3. Zinātniskā novitāte	7
1.4. Darba uzdevumi	8
1.5. Promocijas darba struktūra	8
1.6. Promocijas darba publikācijas un aprobācija	8
2. Metodika	10
2.1. Eksperimentālais pasākumu kopums	10
2.1.1 Čaulas garenlieces testi	10
2.1.2 Eksperimentālā modālā analīze	13
2.1.3 Vibrācijas spektri un režīmi	16
2.2. Datu analīze	20
2.3. Algoritma eksperimentālo pasākumu kopums	25
3. Rezultāti	27
4. Noslēguma piezīmes	30
4.1. Galvenie secinājumi	31
4.2. Rekomendācijas	31
4.3. Turpmākās perspektīvas	32
Pateicība	33
Literatūras saraksts	34

IEVADS

Kosmosa misijās nelielai masai ir izšķiroša nozīme. Atkarībā no lietojuma jomas par katru kilogramu kravnesības, ko paredzēts nogādāt kosmosā, vidēji jāmaksā no 10 000 līdz 20 000 EUR. Tādēļ konstrukcijas masas samazināšana ir ļoti svarīgs uzdevums. Oglekļa kompozīti ļauj samazināt konstrukcijas masu par 30 %, saglabājot to pašu nestspēju. Visas lielās kosmosa aģentūras, piemēram, Eiropas *ESA*, ASV *NASA* vai Ķīnas *CNSA*, kā arī privātie pakalpojumu sniedzēji, piemēram, *Space-X* vai *Rocketlab*, strādā pie oglekļa kompozītu izmantošanas, lai nākotnē samazinātu transportēšanas izmaksas. Šajā jomā notiek intensīva konkurence. Jau gadu desmitiem tiek izmantotas agrīnās telpisko vienvirziena konstrukciju projektēšanas metodes, vienlaikus uzlabojot darbu un ieteikumus sarežģītāku konstrukciju projektēšanai un izmantošanai vairākkārt lietojamu nesējraķešu palaišanai. Starp ierobežojošiem faktoriem ir projektēšanas robežslodzes, kas ir ļoti jutīgas pret nepilnībām un defektiem, tādējādi ir skaidrs virzītājspēks, lai nodrošinātu nedestruktīvu ierobežojošu spēku, kas nodrošina lielāku precizitāti un uzticamību attiecīgā riska novērtēšanai.

Šī promocijas darba mērķis ir izpētīt vibrācijas korelācijas metodes (*VCT*) perspektīvas, kas ļauj papildus kvalifikācijas eksperimentam prognozēt faktisko kritisko slodžu līmeņus noteiktām konstrukcijām un konfigurācijām nedestruktīvā veidā, tādējādi veicinot augstāku drošības līmeni.

VCT metodes princips ir balstīts konstrukcijas dabiskās frekvences un aksiālās (koaksiālās) slodzes korelācijā. Tā ir balstīta fizikālās parādībās, kur dabiskā frekvence samazinās līdz ar katru slodzes pieaugumu un atbilstošo konstrukcijas sprieguma līmeni. Tiklīdz slodze sasniedz garenlieces stāvokli, atbilstošais dabiskās frekvences koeficients kolonnu tipa konstrukcijām parasti ir vienāds ar nulli. Lai gan izmēģinājumu laikā dabisko frekvenci mēra pie pieaugošiem slodzes līmeņiem, var aprēķināt prognozētās galīgās slodzes ekstrapolāciju, nesasniedzot konstrukcijas plīsumu. Tādējādi *VCT* metodi var izmantot kā alternatīvu kritiskās slodzes novērtēšanas metodi, kas nodrošina konstrukcijas papildu drošību, ņemot vērā nenoteiktības, kas saistītas ar fizikālo paraugu. Tomēr gadījumā, ja čaulas vai ārējās konstrukcijas ir jutīgas pret defektiem, piemēram, tās, ko izmanto kosmosa misijās, dabiskās frekvences un slodzes savstarpējā sakarība var būt ļoti sarežģīta un mazāk noturīga. Empīriskās formulas, kas izstrādātas metāliskiem – izotropiem materiāliem, lai aproksimētu šo sakarību. Tomēr šīs formulas nevar izmantot anizotropu stingru konstrukciju projektēšanai.

Jāatzīmē, ka līdzības *VCT* metodes pamatnostādnēs var novērot arī kā dabas parādības. Viens no populārākajiem teicieniem, kas uzreiz nāk prātā, ir teiciens „klusums pirms vētras”. Tas ir, pirms spēcīgas viesuļvētras jūra uz brīdi kļūst pārsteidzoši mierīga. Neraugoties uz pastiprināto vēju, ūdens virsma paliek vienmērīga un gluda un uz tās nav ne mazāko svārstību. Vēl viens piemērs dabas parādībai, kas „klusē”, ir vulkāni. Ja tuvumā esošs aktīvs vulkāns pēkšņi aktivizē savu darbību ar tvaiku, dūmiem un pazemes grūdieniem, tas acīmredzot piedzīvo izvirdumu. Nesen pētnieki konstatēja, ka vēl bīstamāka pazīme ir pēkšņs pilnīgs klusums.

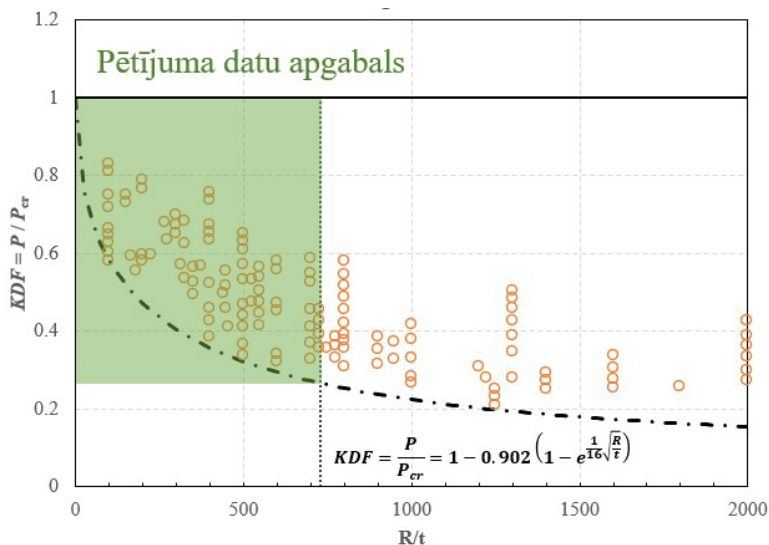
Kārnegija Zinātņu institūta pētnieku komanda kopš 2009. gada ir novērojusi seismisko aktivitāti vairāk nekā 50 aktīvos vulkānos, kuros notiek vulkānu izvirdumi. Sākotnēji viņi meklēja kādu likumsakarību ģeoloģiskajā aktivitātē pirms izvirdumiem, pēc kuras varētu

paredzēt izvirdumus. Raksturīgais modelis, ko viņi atrada, bija aktivitātes trūkums tieši mirklī pirms izvirduma, vulkāni pēkšņi palika klusi un mierīgi.

Tagad, kad ir zināms par šo klusumu pirms izvirduma, pētnieki cer, ka šo informāciju varēs izmantot brīdinājumos pirms izvirduma. Diemžēl šim nolūkam atvēlētais laiks būtu īss. Lielākajā daļā izvirdumu klusuma periodi bija īsāki par 30 minūtēm, un dažos gadījumos pauzes ilga tikai dažas minūtes. Garākais klusuma periods bija reģistrēts 10 stundu, un pēc tam sekoja arī lielākais izvirdums, kādu pētnieki bija novērojuši. Tas varētu būt virziens turpmākai *VCT* attīstībai.

1. PAMATOJUMS

Gadu gaitā sākotnējie *NASA* konstrukcijas ieteikumi ir veiksmīgi izmantoti daudzu *NASA* kosmosa transportlīdzekļu, tostarp *Space Shuttle* cieto nesējraķetes (*SRB*) un ārējās degvielas tvertnes (*ET*), kā arī *Space Launch System*, jeb kosmosa palaišanas sistēmas (*SLS*), konstrukcijā. Tomēr laika gaitā ir pierādījies, ka sākotnējās *NASA* vadlīnijās noteiktie samazinājuma koeficienti (*KDF*) un ieteikumi var radīt pārāk konservatīvas izlieces slodzes prognozes, ja tās piemēro modernajām kosmiskās aviācijas konstrukcijām. Tas galvenokārt ir tādēļ, ka zemākās robežas *KDF* sastāv no testu datiem par cilindriskām konstrukcijām, kas ražotas un testētas, izmantojot novecojušus procesus, un neatspoguļo uzlabojumus, kas novēroti, nesēn testējot modernas aerokosmiskās kvalitātes čaulas konstrukcijas, kas izgatavotas, izmantojot modernus materiālus un uzticamus ražošanas procesus. Turklāt *NASA SP-8007* sākotnējie pētījumi bija ierobežoti ar rādiusa/biezuma attiecībām, kas patlaban nosaka modernu konstrukciju tendences, piemēram, lielu rūpnieciski izgatavotu metāla cilindra vai kompozītmateriālu cilindra konstrukciju.



1.1. att. *NASA-SP8007* samazinājuma (*knock-down*) koeficienta līkne (*Weingarten V. I.*, 1968).

Šī promocijas darba galvenais mērķis ir paplašināt vibrācijas korelācijas metodes uzticamību pret nepilnībām jutīgu kompozītmateriālu cilindrisku konstrukciju novērtēšanai. Veicot lielāko eksperimentālo testu, kas veltīts *VCT*, konkrētā pētījuma mērķis ir nodrošināt datu kopu gan apmācībai, gan aizstājējmodeļu izstrādei, formulējot parametrisko vienādojumu. Kā tika konstatēts līdz šim, ir trūkums statistiski ticamu eksperimentālo datu kopuma jomā, jo 1968. gadā tika veikti tādi pētījumi kā *NASA/SP-8007*, kuros kompozītmateriāli tika ignorēti. Tādēļ ražošanas iespēju un testēšanas aprīkojuma jutības novērtēšana bija vēl viens pašreizējā pētījuma mērķis. Papildu eksperimentālajiem pētījumiem tika veikta skaitliskā simulācija, izmantojot galīgo elementu metodi (*FEM*) un mākoņskaitļošanas iespējas. Tāpēc, lai izstrādātu *VCT* vadlīnijas, kurām ir nodrošināta statistiskā ticamība, tika aptverts gan ģeometrisko, gan mehānisko īpašību diapazons. Lai to panāktu, tika mēģināts izgatavot virkni *CFRP* dobu apaļa šķērsriezuma kolonnu un cilindrisku čaulu ar mainīgu rādiusa/biezuma koeficientu un rādiusa / brīvā augstuma (lokanības) koeficientu, tostarp slāņu izkārtojuma orientāciju. Jāatzīmē, ka R/t attiecība ir apzināti paredzēta robežās no 100 līdz 750, savukārt lokanība h/R var svārstīties robežās no 8 līdz 1. Ar izvēlēto kārtojumu skaitu un robežnosacījumiem tika nodrošināta statistiski nozīmīga testa sērijas ražošanas sērija. (*DESICOS*, 2019); (*NASA*, 2019); (*ESA*, 2019).

1.1. Promocijas darba mērķis

Metodoloģijas izstrāde, lai paplašinātu vibrācijas korelācijas metodes uzticamību pret nepilnībām pakļautas kompozītmateriālu cilindriskās struktūras novērtēšanai.

1.2. Aizstāvamās tēzes

Promocijas darba hipotēze

1. Pastāv sakarība starp saspiešanas slodzes līmeņa palielināšanos un cilindrisku čaulu raksturīgās frekvences samazināšanos.
2. Vibrācijas korelācijas metode ir piemērojama gan izotropām cilindriskām čaulām, gan ortotropām čaulām.
3. Modificētā Arbello normalizācijas metode cilindrisku čaulu kritiskās slodzes prognozēšanai, izmantojot vibrācijas korelācijas metodi, nosaka augstu precizitāti, salīdzinot ar klasisko pieeju.

1.3. Zinātniskā novitāte

1. Izstrādātā jauna eksperimentālo datu normalizācijas metode, kas ir loģisks turpinājums Arbello pieejai.
2. Izstrādāta un pārbaudīta principiāli jauna pieeja, lai noteiktu frekvences nobīdi, pakļaujot slodzei cilindriskās čaulas.
3. Analizējot lielu skaitu šajā pētījumā veikto eksperimentu rezultātus, ir ievērojami uzlabota vibrāciju korelācijas metodes ticamība nepilnībām pakļautu cilindrisku konstrukciju novērtēšanai.
4. Jaunākās paaudzes kosmosa nesējraķešu konstrukcijas testēšanai veikta *VCT* aprobācija, ietverot sarežģītu sloģojuma scenāriju.

1.4. Darba uzdevumi

1. Apstiprināt korelāciju starp slodzes līmeņa palielināšanos un frekvences samazināšanos cilindriskām čaulām.
2. Validēt *VCT* metodi, izgatavojot un eksperimentāli pārbaudot izotropus un ortotropus cilindrus plašās R/t un R/h attiecību robežās.
3. Palielināt kritiskā spēka prognozēšanas precizitāti, modificējot eksperimentālo datu normalizāciju.
4. Pārbaudīt iespējas prognozēt kritisko spēku ar *VCT* metodi cilindriskām čaulām ar acīmredzamiem defektiem vai iekšējo spiedienu.
5. Aprobēt *VCT* metodi, izmantojot reāla mēroga objektu.

1.5. Promocijas darba struktūra

1. nodaļa. Pamatojums. Šajā nodaļā ir aprakstīta promocijas darba pētījuma joma, formulētas galvenās pētījuma hipotēzes un pētījuma novitātes nozīme saistībā ar *VCT* metodi. Nodaļā sniegts arī īss promocijas darba struktūras apraksts, kā arī publikāciju un referātu starptautiskajās konferencēs saraksts.

2. nodaļa. Metodoloģija. Šajā nodaļā ir aprakstīti galvenie faktori, kas nepieciešami veiksmīgai kritiskās slodzes prognozēšanai, izmantojot *VCT* metodi. Ir izklāstīti trīs galvenie posmi.

2.1. Eksperimentālais pasākumu kopums. Detalizēti tiek aplūkota eksperimenta procedūra, ko savukārt varētu iedalīt divos apakšposmos. Aprakstīti faktori, kas ietekmē kritisko spēku. Norādīts aprīkojums, kas nepieciešams kritiskās slodzes prognozēšanai, izmantojot izvēlēto metodiku.

2.2. Detalizēti ir aplūkots, ko, kur un kā mērīt, kā arī problēmas, ar kurām nākas saskarties *VCT* datu vākšanas laikā.

2.3. Datu analīze. Šajā nodaļā aplūkotas eksperimentālo datu normalizācijas iespējas, kas jāpiemēro kritiskās slodzes prognozēšanai, izmantojot *VCT* metodi.

3. nodaļa. Rezultāti. Šajā nodaļā sniegtas publikācijas, kurās atspoguļoti galvenie rezultāti, kas iegūti, veicot pētījumus un piemērojot *VCT* metodi. Rezultāti publicēti piecos citētos avotos, kuru kopējais ietekmes faktors ir **25** un kopējais citējumu skaits *Scopus* žurnālos ir **125**.

4. nodaļa. Nobeiguma piezīmes. Šajā nodaļā izklāstīti galvenie secinājumi un diskusija par problēmām un to risinājumiem saistībā ar *VCT* metodes praktisku lietošanu kritiskās slodzes prognozēšanai.

1.6. Promocijas darba publikācijas un aprobācija

Galvenie promocijas darba rezultāti apkopoti piecās zinātniskās publikācijās. Pētījuma rezultāti prezentēti piecās konferencēs.

Zinātniskās publikācijas

1. Kalnins K., Arbelo M.A., Ozolins O., **Skukis E.**, Castro S.G.P., Degenhardt R., Experimental non-destructive test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using vibration correlation technique, Shock and Vibration Volume **2015**, Article ID 729684.
2. Arbelo M. A., Kalnins K., Ozolins O., **Skukis E.**, Castro S.G.P., Degenhardt R., Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using a vibration correlation technique, Thin-Walled Structures, Volume 94, 1 September **2015**, Pages 273–279.
3. **Skukis E.**, Ozolins O., Andersons, J., Kalnins, K., Arbelo, M. A., Applicability of the vibration correlation technique for estimation of the buckling load in axial compression of cylindrical isotropic shells with and without circular cutouts (Shock and Vibration, Volume **2017**), 29.
4. Franzoni F., Odermann F., Wilckens D., **Skukis E.**, Kalniņš K., Arbelo M. A., Degenhardt, R. Assessing the axial buckling load of a pressurized orthotropic cylindrical shell through vibration correlation technique, Thin-Walled Structures, Volume 137, April **2019**, Pages 353–366.
5. **Skukis E.**, Jekabsons G., Andersons J., Ozolins O., Labans E., Kalnins, K. Robustness of empirical vibration correlation techniques for predicting the instability of unstiffened cylindrical composite shells in axial compression, Polymers, Volume 12, Issue 12, December **2020**.

Zinātniskās konferences, kurās prezentēti promocijas darba rezultāti

1. **Skukis E.**, Kalnins K., Ozolins O., *Assesment of the Effect of Boundary Conditions on Cylindrical Shell Modal Responses*, 4. starptautiskā konference CIVIL ENGINEERING' 13 – I daļa STRUKTURĀLĀ INŽENIJA, Jelgava 2013. g.
2. **Skukis E.**, Kalnins K., Chate A, *Preliminary assessment of correlation between vibrations and buckling load of stainless steel cylinders*, Shell Structures: Theory and Applications – 10. starptautiskā konference “Shell Structures: Theory and Applications”, Gdaņska; Polija, 2013. gada 16. oktobris.
3. **Skukis E.**, Kalnins K., Ozolins O, *Application of vibration correlation technique for open hole cylinders*, 5. starptautiskā konference ND-KhPI2016, harkova, Ukraina, 2016. gada 27.–30. septembris.
4. **Skukis E.**, Ozolins O., Andersons, J., Kalnins, K., Arbelo, M. A., *Experimental Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells by Vibration Correlation Technique*, Procedia Engineering, 12. starptautiskā konference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” (MBMST 2016); Viļņa; Lietuva; 2016. gada 26. maijs.
5. **Skukis E.**, Kalnins K., Jekabsons G., Ozolins O., *Benchmarking of vibration correlation techniques for prediction of buckling load of cylindrical shells*, 16. starptautiskā konference “Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing” (ECSSMET), **2021**.

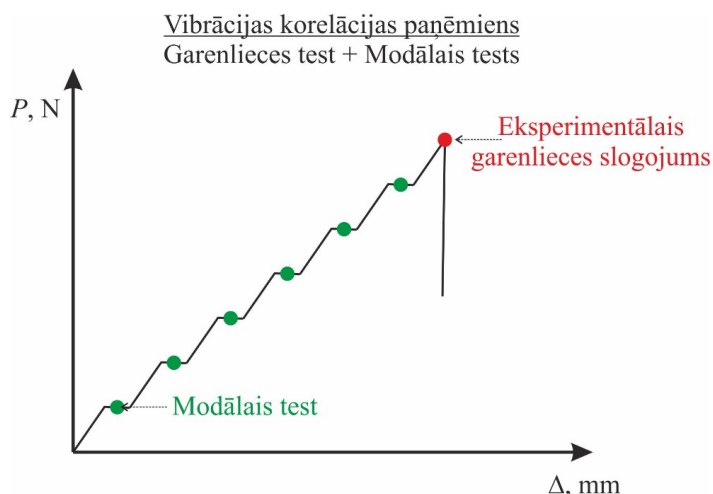
2. METODIKA

Šajā nodaļā aprakstīti trīs galvenie posmi, kas nepieciešami kritiskās slodzes prognozēšanai ar *VCT*:

- *VCT* eksperimentālais pasākumu kopums: tā ir iedalīta divās eksperimentālās pieejās, kas ir nepieciešamas, lai veiktu prognozēšanu ar *VCT* metodi;
- ierosmes, visaptverošu mērījumu un iestatījumu, kā arī citu turpmākai *VCT* analīzei nepieciešamo datu iepriekšēja atlase;
- datu analīze – eksperimentālo datu normalizēšanas process, kritiskā spēka aprēķināšana un prognozēšana, izmantojot šo metodi.

2.1. Eksperimentālo pasākumu kopums

Šajā apakšnodaļā aprakstītas eksperimentālo pasākumu laikā veiktās procedūras, ko var iedalīt divās galvenajās grupās: korpusa (čaulas) garenlieces testi un eksperimentālā modālā analīze, kā redzams 2.1. attēlā.

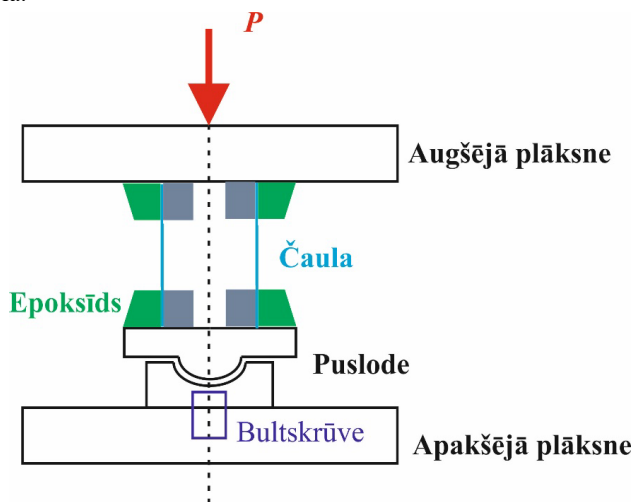


2.1.1. ČAULAS GARENLIECES TESTI

Lai veiktu garenlieces testus, ir nepieciešama universālā kvazistatisko testu ierīce (*Degenhardt, 2007*). Šis iekārtas galvenais uzdevums ir slogot paraugu, līdz tiek sasniegta noteiktā slodze, un uzturēt šo slodzi visu laiku, kamēr tiek veikti cilindra vibrāciju mērījumi (2.1. att.). Vēl viens svarīgs aspekts ir iepriekšēja pamatfrekvenču noteikšana, izmantojot kvazistatisko testēšanas iekārtu, lai testēšanas laikā novērstu testējamā parauga rezonansi. Iespēja kontrolēt slodzi, izmantojot pārvietojumu, ļauj izvairīties no testējamā parauga iznīcināšanas testēšanas laikā, kas arī ir ļoti svarīgi, lai varētu veikt atkārtotu eksperimentu ar cilindriem, kas izgatavoti no kompozītmateriāla (*Zimmermann, 2006; Wilckens, 2020*).

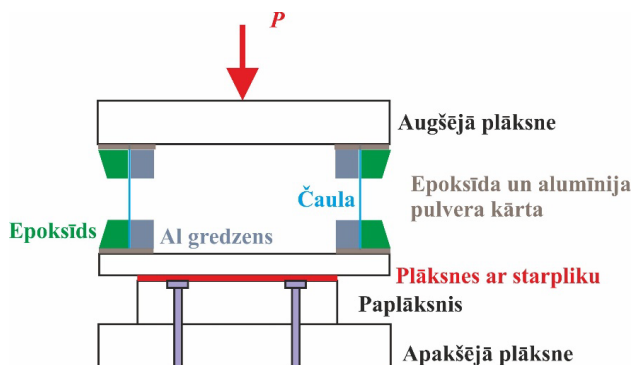
Lielākajā daļā eksperimentu izmantotā galvenā iekārta ir universālā kvazistatiskā testēšanas iekārta *Zwick 100*. Šai iekārtai ir noteikti ierobežojumi – maksimālais testējamā cilindra diametrs ir 500 mm, maksimālais augstums – 1000 mm, arī slodze ir ierobežota līdz 100 kN.

Var būt divu veidu robežstāvokļi. Pirmais veids ietver robežnosacījumus cilindra nostiprināšanai testēšanas iekārtā. Pirmie eksperimenti tika veikti ar cilindriem, kas novietoti starp divām plāksnēm. Augšējā plāksne bija cieši pieskrūvēta pie testēšanas mašīnas, apakšējā plāksnē bija uzstādīts puslodes savienojums, kas ļāva griezt atbalsta plāksni, tādējādi novēršot lieces momentus un veicinot cilindra ass pašizlīdzināšanu ar slodzes virzienu, kā shematiski parādīts 2.2. attēlā.



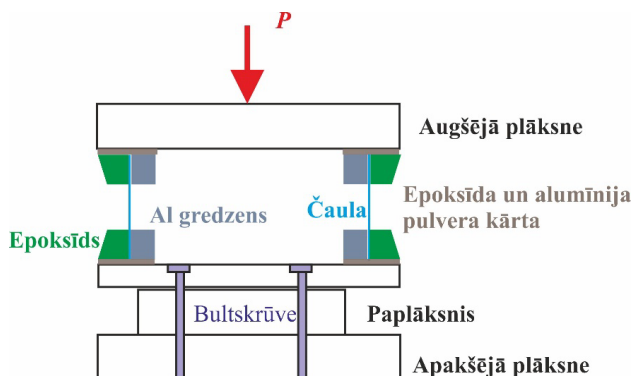
2.2. att. Cilindru saspiešanas testu uzstādīšanas shēma, testējot ar puslodes savienojumu.

Sakarā ar puslodes modelēšanas sarežģītību analītiskajā modelī un problēmām, ko rada cilindra vienpusēja slodze, t. i., izlieces brīdī lode kompensēja slodzi, turpmākā destrukcija tika lokalizēta vietā ar lielāko defektu. Kopumā nebija iespējams noteikt garenlieces formas visā cilindra virsmā. Tādējādi tika veiktas izmaiņas robežnosacījumos. Lai novērstu slodzes nepilnības un kontaktvirsmu nesakrītības, gan augšējās, gan apakšējās čaulu malas, kas balstījās uz attiecīgajām mašīnas plāksnēm, tika savienotas ar plāksnēm, izmantojot sveķu/pulvera masu. Testa konfigurācijā bija iestrādātas starplikas (paplāksņi) pie apakšējās mašīnas plāksnes (2.3. att.). Lai novērstu nelielas spraugas starp abām virsmām un nodrošinātu vienmērīgu slodzes sadalījumu uz testējamās virsmas, starp apakšējo slodzes plāksni un slodzes sadalīšanas paplāksni, kas piestiprināta pie slodzes rāmja, tika ievietotas ļoti plānas metāla loksnes.



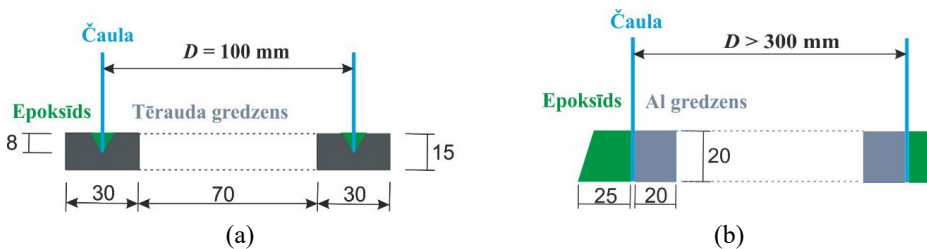
2.3. att. Cilindru uzstādīšanas shēma spiedes testam, testēšana notiek, izmantojot starplikas plāksnes.

Šāda pieeja robežnosacījumiem rada atkarību no operatora, personas, kas uzstādīs iekārtu testēšanai, un samazina rezultātu atkārtojamības iespēju. Pēc DLR partneru veikto eksperimentu analīzes tika optimizēti robežnosacījumi, apakšējā plāksne tika pieskrūvēta pie gartera, kā redzams 2.4. attēlā.



2.4. att. Cilindru saspiešanas testu uzstādīšanas shēma, testēšana, izmantojot starplikas plāksnes.

Otrs veids ietver paša cilindra robežnosacījumus (*Lancaster E. R.*, 2000). 100 mm diametra čaulu malas tika iestiprinātas starp paralēliem tērauda gredzeniem 8 mm dziļās apaļās rievās ar V veida šķērsgriezumu, kas tika aizpildītas ar epoksīdsveķu un smalkas smiltis maisījumu, kā shematiski parādīts 2.5. a attēlā. Gan 100 mm diametra čaulu augšējās, gan apakšējās malas no iekšpuses saspīestas ar alumīnija gredzeniem un aplietas ar epoksīdsveķu javu, kas satur smalkas smiltis un izdedžus (2.5. b att.).



2.5. att. Cilindru montāžas shēma: a) tērauda gredzena rievā; b) uzlikšana uz testa mašīnas plāksnēm. Izmēri attēlā norādīti milimetros.

Šo testu rezultāti un ietekme aplūkoti nākamajā nodaļā. Lai palielinātu eksperimentālo kritisko slodzi, kā arī vienkāršotu galīgo elementu modeli, tika veikta robežnosacījumu optimizācija. Aprēķins, izmantojot galīgo elementu metodi, ir nepieciešams, lai noteiktu lineāro garenieces slodzi (Castro, 2014); (Wagner, 2017), kas tālāk tiek piemērota uz VCT balstītai kritiskās slodzes prognozēšanai.

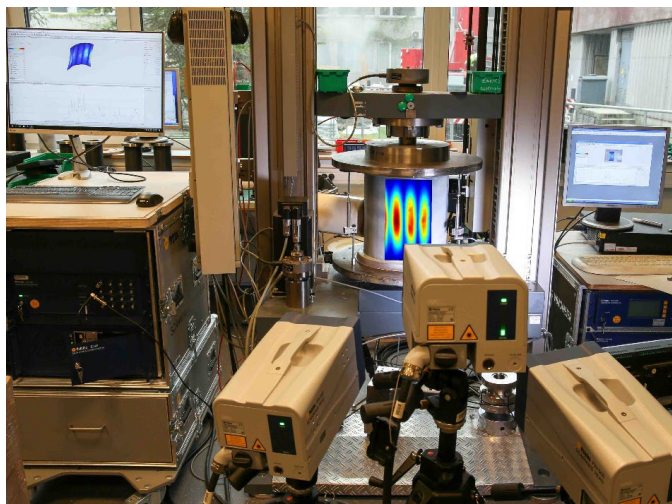
2.1.2. EKSPERIMENTĀLĀ MODĀLĀ ANALĪZE

Eksperimentālā modālā analīze (EMA) ir visplašāk izmantotā procedūra šādiem pētījumiem (Maia N., 1997; Kjær, 2022). Tā nodrošina sistēmas frekvences atbildes funkcijas (FRF), izmantojot atbilstošos ieejas datus par ierosmes spēkiem un izmērītos izejas datus par vibrācijas atbildi. Eksperimentālās iekārtas vibrāciju mērījumiem un svārstību formu veidošanai tiek ražotas ļoti dažādas. Viens no izplatītākajiem vibrāciju mērīšanas veidiem ir vibrosensors – kontaktmetode (ISO7626-2, 2015). Mērījumus veic fiksētā vietā, kurā ir uzstādīts vibrosensors (Zhang Y. H., 2008). Šāda pieeja ir salīdzinoši lēta, tā ļauj iegūt nepārtrauktus vibrāciju attēlus ar laika reakciju, taču tai ir virkne vājo vietu, piemēram, papildu masa uz pārbaudāmā priekšmeta (Wesolowski M., 2010). Problēma ir iegūt svārstību formas, kas nepieciešamas klasiskās VCT metodes kontrolei. Šī problēma ir tāda, ka nepieciešams radīt ierosinājumu dažādās iepriekš noteiktās vietās, un tas rada palielinātu EMA laiku.

Pastāv arī vairākas iespējas, kā iedarbināt vibrācijas uz cilindru: pjezoelektriskais aktuators, modālais kratītājs, visi šie izpildmehānismi maina robežstāvokļus un palielina testējamā objekta masu. Ar trieciena āmuru radītā vibrācija var izraisīt agrīnāku cilindra lodzes bojājumu, kā arī palielina laiku, kas nepieciešams svārstību formu iegūšanai. Tomēr visas iepriekš minētās iespējas ir piemērotas izmantošanai, ja ir skaidra koncepcija par iegūstamajiem rezultātiem arī ierobežota budžeta ietvaros. Šo problēmu risinājums ir bezkontakta reakcijas devēju (sensoru ierīču) izmantošana. Uz lāzeru balstīti optiskie devēji var veiksmīgi aizstāt tradicionālos pjezoelektriskā tipa devējus un novērst jebkādu papildu masu, ko rada sensoru ierīces. Pēdējā laikā visbiežāk izmantotie lāzeru devēji ir balstīti Doplera velocimetra principā, un tie ir piesaistījuši daudzu pētnieku uzmanību, kas nodarbojas ar eksperimentālo modālo analīzi. Tāpēc vibrāciju uztveršanai tiek izmantota ļoti jutīga optiskā sistēma – POLYTEC skenējošā lāzervibrometra sistēma PSV-400 (Theory, 2008; Polytec, Laser Doppler vibrometry, 2022). Vēlāk radās iespēja salīdzināt lāzervibrometra sistēmas PSV-500 3D darbību. 2.6. attēlā redzama tipiska VCT konfigurācija.

Mērījumu ķēdē ir iesaistītas šādas daļas:

- ierosmes signāla avots (ģenerators);
- jaudas pastiprinātājs;
- ierosmes skaļrunis;
- vibrometra sistēma *PSV-400* un *PSV-500-3D*;
- analizators (datora sistēma).



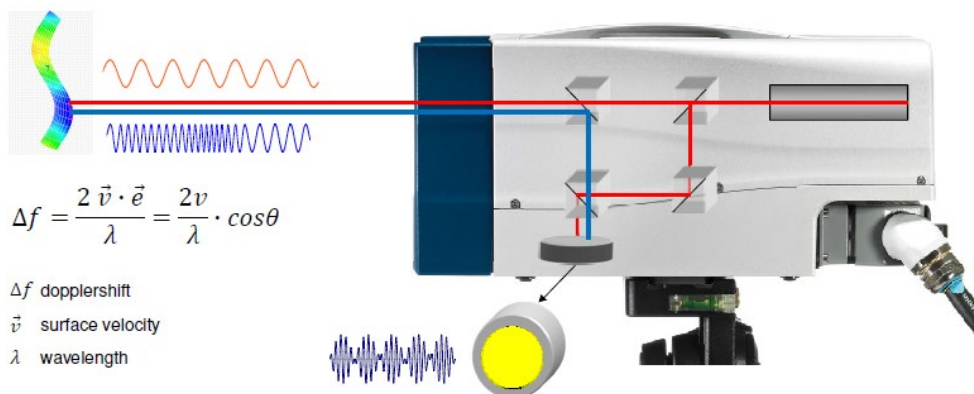
2.6. att. Tipiska *VCT* testa konfigurācija.

SKENĒŠANAS LĀZERA VIBROMETRS *PSV-400*

PSV-400 darbojas, izmantojot Doplera efektu, mērot vibrējoša objekta atpakaļizkliedētā gaismas viļņa frekvences izmaiņas. Ja vilnis tiek atstarots no vibrējoša objekta un noteikts ar lāzera vibrometru, izmērīto viļņa frekvences nobīdi var aprakstīt šādi:

$$\Delta f = \frac{2\vec{v} \cdot \vec{e}}{\lambda} = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta, \quad (2.1)$$

kur v ir objekta ātrums un $\lambda = 633 \text{ nm}$ ir izstarotā viļņa garums. Lai noteiktu objekta ātrumu, ir jāmēra Doplera frekvences nobīde pie zināma viļņa garuma. To veic ar lāzera interferometru.



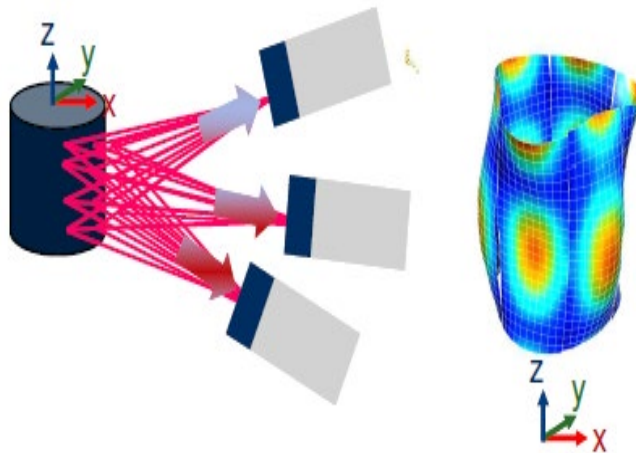
2.7. att. Tehnoloģiskā vide (*Polytec, Polytec* skenēšanas vibrometrs, teorijas rokasgrāmata. *PSV, PSV-3D, MSA/MSV*, programmatūra 8.5, 2001).

SKENĒŠANAS LĀZERA VIBROMETRS *PSV-500 3D*

Skenējošā lāzera vibrometra *PSV-500 3D* darbības galvenais princips ir balstīts uz Doplera efektu (2.8. att.). Galvenajā galviņā iebūvētais attāluma mērītājs ir papildierīce, kas ļauj mainīt objekta ģeometriju; šī funkcija bija pieejama arī agrāk, taču attāluma mērītāju bija nepieciešams integrēt kā atsevišķu ierīci, kas uzstādīta ārpus kameras. Ģeometrijas skenēšanas precizitāte ir aptuveni 1 mm atkarībā no atstarotās virsmas kvalitātes. Pamatīpašības, kas raksturo ģeometriju, ir šādas:

- trīs sinhronizēti lāzera skeneri ar kopīgu vadību;
- lāzera stari krustojas uz virsmas;
- tiek importēta vai izmērīta ģeometrija;
- vienlaikus tiek mērīti trīs vibrācijas komponenti;
- koordinātu transformācija objekta koordinātu sistēmā.

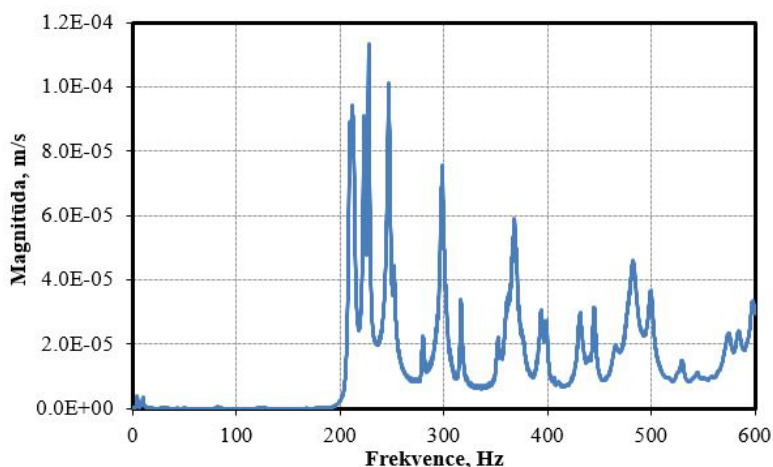
Papildu atšķirība ir iespēja ar katru skenera galviņu izmērīt savu punktu, t. i., iegūt trīs vibrācijas rezultātus vienlaikus. Mērījumiem var izmantot arī tikai vienu galviņu, tāpat kā iepriekšējā modeļa *PSV-400* gadījumā, tikai ar vienu atšķirību – tiks iegūti skenētā cilindra ģeometriskie dati.



2.8. att. PSV-500 3D darbības princips (Polytec, Polytec PSV-E-500 lietošanas instrukcija, 2016).

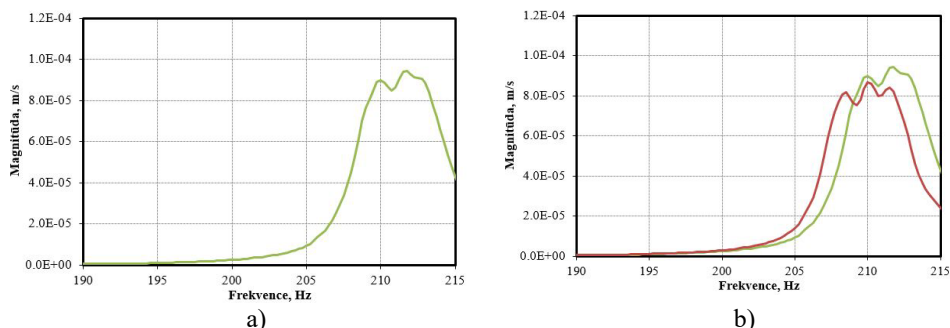
2.1.3. VIBRĀCIJAS SPEKTRI UN REŽĪMI

Kā minēts iepriekš, VCT balstītā prognozēšanā ir vajadzīgi mērījumi, kas raksturo dabisko frekvenci pie fiksētas slodzes, t. i., ir nepieciešams novērot dabiskās frekvences izmaiņas slodzes ietekmē. Ņemot vērā to, ka dabisko frekvenču skaits ir liels, mērījumu diapazons ir pirmais ierobežojums (Hamidzadeh H. R., 2009). Frekvences raksturlīknes piemērs redzams 2.9. attēlā. Frekvenču maksimumi ar mazu amplitūdu reakcijas sākumā ir tieši konstrukcijas, grīdu un sienu dabiskās frekvences. Svarīgi pastāvīgi uzraudzīt, lai testēšanas laikā cilindra pašfrekvence tiem nepietuvotos. Pēc 200 Hz šim paraugam parādās novērojamās dabiskās frekvences.



2.9. att. Frekvences raksturlīkne.

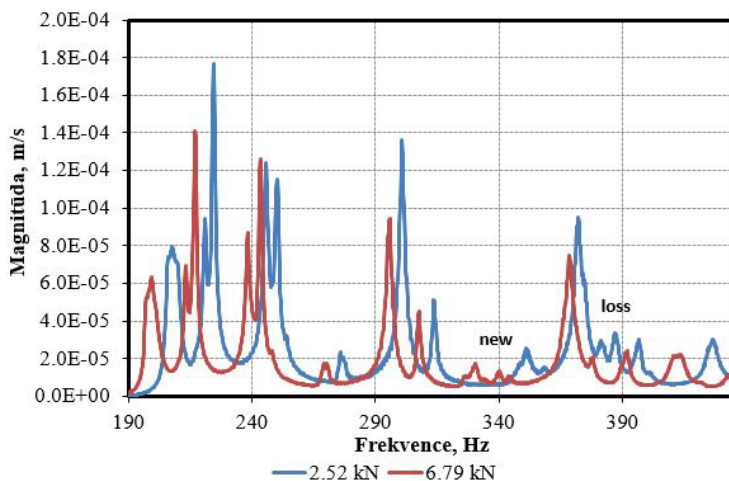
Katrai frekvencei ir sava svārstību forma, un ir svarīgi saprast, ka, mainoties slodzei, tiek novērota viena un tā pati svārstību forma. Kādas problēmas šeit var rasties? Patiesi ir daudz vājo vietu jeb problēmu. Ideālā pasaulē ideāla cilindra gadījumā frekvencei būs divas simetriskas svārstību formas. Eksperimentu pasaulē šīs svārstību formas būs atdalītas, t. i., būs attālinātas, bet tā tas nav vienmēr, jo šīs simetriskās formas var arī nebūt (2.10. a att.). Līdzīgā veidā citu svārstību formu tuvuma dēļ var rasties svārstību formu secības izmaiņas slodzes ietekmē, ko ir sarežģīti novērot tikai pēc frekvences raksturlīknes (2.10. b att.).



2.10. att. Frekvences raksturlīkne ar diviem vienas frekvences režīmiem.

Līdz ar to ir jākontrolē svārstību forma, tās izmaiņas slogojuma laikā.

Turpmākā problēma ir tā, ka izvēlēta svārstību forma var izzust slodzes ietekmē, kā redzams 2.11. attēlā. Jo augstāka ir dabiskā frekvence, jo lielāka ir šāda efekta iespējamība, turklāt pie šīm augstajām frekvencēm parādās jaunas dabiskās frekvences.



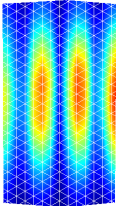
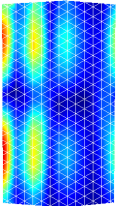
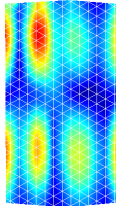
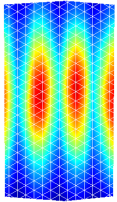
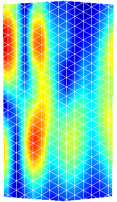
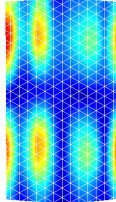
2.11. att. Frekvences raksturlīkne, piemēra zudumi un jauna dabiskā frekvence.

Katrai dabiskajai svārstību formai ir apzīmējums (m, n) – neitrālo līniju daudzums uz x un y asīm. Šādu svārstību dabisko formu piemērs pie slodzes un bez tās redzams 2.12. attēlā (Avieable P., 2022). m aprēķina sarežģītību rada vertikālo neitrālo līniju virsotņu skaits un to

virsmu laukumu attiecība pret cilindra kopējo virsmas laukumu. Vieglāk ir aprēķināt horizontālo līniju skaitu n .

Izmantojot *PSV-500 3D*, var iegūt svārstību dabisko formu visam cilindram visā diametrā, taču tam nepieciešamais laiks ir nesamērīgi ilgs, salīdzinot ar ieguvumiem, ko var sniegt iegūtā informācija.

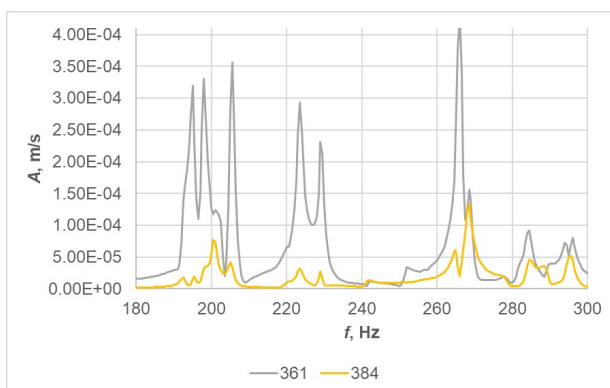
Lai noteiktu katra vibrācijas režīma svārstības aksiālās slodzes laikā, tiek izmantots skaitlisks algoritms, kura pamatā ir modālās ticamības kritērijs (*MAC*) (*Pastora M.*, 2012). *MAC* indekss veic divu vienāda garuma vektoru salīdzinājumu, un indekss atdod vērtību, kas ir tuvu vienādai, ja starp abiem vektoriem pastāv lineāra sakarība, un tuvu nullei, ja tie ir lineāri neatkarīgi, kas tika piemērots liela skaita cilindru noteiktas formas svārstību novērošanai. Rezultāts ir pieejams vietnē vct.rtu.lv un publicēts vienā no rakstiem.

Slodze, kN	Režīms	f , Hz	Režīms	f , Hz	Režīms	f , Hz
0,0		211,75		394,25		431,50
4,96		202,75		378,00		416,75

2.12. att. Īpašrežīmi ar slodzi un bez slodzes.

Atbilde uz pirmo jautājumu par mērāmo parametru ir tāda, ka tiek izmērītas vai faktiski uzraudzītas eksperimentāli iegūtās svārstību noteiktas formas, kas izpaužas visā slodzes diapazonā pirmās īpašfrekvences izmaiņas slodzes ietekmē. Publicētajos darbos novērošana tika veikta arī citām svārstību dabiskajām formām, lai gan tas nedeļa būtisku rezultāta uzlabojumu, piemērojot normalizēšanas metodi, kas tiks aplūkota turpmāk.

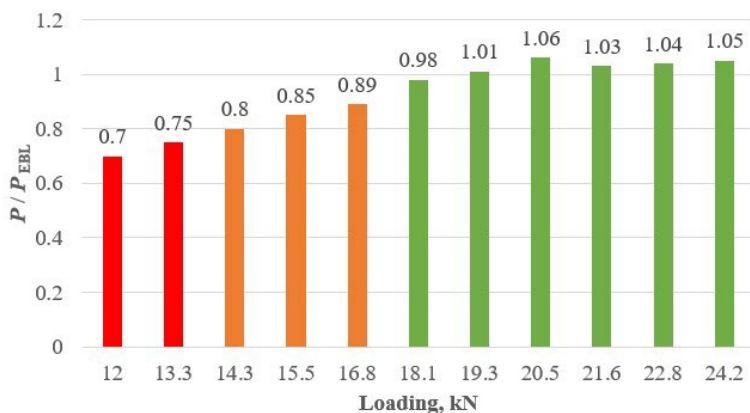
Mērījumus veic uz cilindra virsmas, kā aprakstīts iepriekš, katrai formai ir nulles līnijas, un ir loģiski, ka informācija, kas iegūta no šādiem sektoriem, būs zemas kvalitātes. Piemērs redzams 2.13. attēla frekvences raksturlīknē.



2.13. att. Frekvences atbildes reakcija ar sliktiem un labiem mērījumu punktiem.

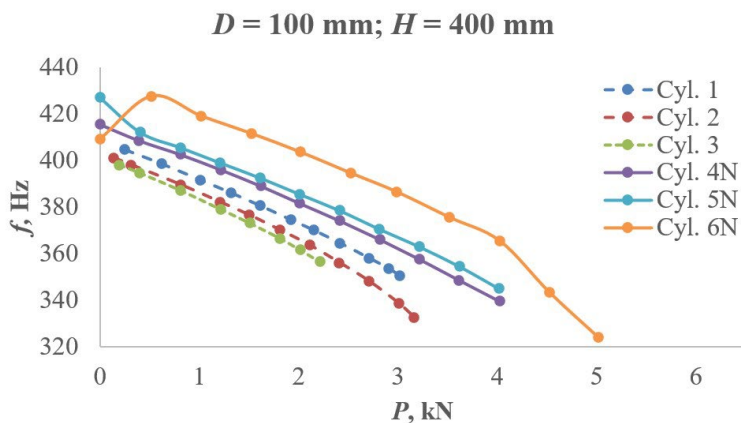
Mērījumu punktu skaits ietekmē modālo raksturlielumu mērīšanai nepieciešamo laiku un svārstību formas precizitāti. Vēl viens faktors, kas ietekmē eksperimenta laiku, ir paraugu ņemšanas biežums. Šis faktors ir tieši atkarīgs no pirmās frekvences vērtības. Jo zemāka ir pirmā frekvence, jo lielāks ir nepieciešams paraugu ņemšanas biežums. Var minēt vienkāršu piemēru: pie $\Delta f = 0,25$ Hz mērījums vienā punktā jāveic ar intervālu $(1/\Delta f)$ 4 sek. Šī vērtība jāreizina ar punktu skaitu, pieskaitot pārejas laiku no viena punkta līdz otram, pievienojot atkārtotu mērījumu, ja punkts atšķiras no citiem pēc atbildes reakcijas. Tādējādi iegūst kopējo laiku, kas vajadzīgs, lai izmērītu vienu pozīciju *VCT* prognozei. Šādi 10 minūšu testēšanas laikā no virsmas var izmērīt aptuveni 120 punktus ar $\Delta f = 0,25$ Hz. Rodas jautājumi: vai 120 punkti ir daudz vai maz un vai 10 minūtes ir ilgs laiks. Uz šiem jautājumiem nav vienotas atbildes. Šis parametrs ir atkarīgs no testējamā priekšmeta lieluma un paraugu ņemšanas biežuma. Jāņem vērā arī slodzes atslābums testēšanas laikā, t. i., slodze testēšanas laikā samazinās.

Vēl viens svarīgs faktors, lai izmērītu īpašfrekvenci pie dažādām slodzēm, ir pozīciju skaits. Jānosaka, cik tuvu eksperimentālās kritiskās slodzes vērtībai jāveic mērījumi. Sākotnējā iepazīšanās posmā ar *VCT* metodi mērījumus veica pie 50 % no eksperimentālās kritiskās slodzes. Kritiskās slodzes prognozēšanas pielāide pārsniedza 10 %, kas bija nepieņemami. Problēma ir tāda, ka pirms deformācijas testa eksperimentālā kritiskā slodze nav zināma. Eksperimenti tika veikti ar metāla cilindriem, kurus pēc garenlieces sabrukuma atkārtoti nevar testēt, bet galvenais pētījuma mērķis bija noteikt maksimālo kritisko slodzi un apzināties iespēju izmērīt datus *VCT* prognozēšanai. Vēlāk testēšana tika veikta ar oglekļa cilindriem, kas bija piemēroti vairākkārtējai testēšanai. Tika atklāts, ka *VCT* metode kļūst arvien precīzāka kritiskās slodzes prognozēšanā, tuvojoties eksperimentālajam kritiskajam spēkam slodzes ziņā, kā redzams 2.14. attēlā, pie eksperimentālās kritiskās slodzes 25,04 kN.



2.14. att. Garenlieces slodzes prognozēšana, izmantojot *VCT* metodi dažādiem slodzes diapazoniem.

Vēl viens svarīgs faktors, kas jāņem vērā, ir pirmie dati, kas izmantoti *VCT* balstītā prognozēšanā pie mazas slodzes, kas tuva 0 kN. Tika novērots, ka dažu eksperimentu laikā frekvence pie slodzes bija augstāka nekā pie zemākas slodzes (2.15. att. dati par *Cyl.* 6 N). Turklāt uzskatāmu uzvedību sākotnējā posmā var novērot *Cyl.* 4N gadījumā, kad notiek straujš frekvences samazinājums, salīdzinot ar turpmāko slogošanu. Šāda uzvedība, visticamāk, liecina par dažām problēmām robežnosacījumos.



2.15. att. Anomālija sākotnējā testēšanas stadijā.

2.2. Datu analīze

Koncepcija par konstrukcijas garenlieces slodzes attiecināšanu uz slodzes līmeni, kurā īpašfrekvence ir nulle, ir zināma jau vairāk nekā gadsimtu, un tā tiek piedēvēta Sommerfeldam (*Sommerfeld*, 1905). Tomēr tikai pagājušā gadsimta 50. gados šī koncepcija pirmo reizi tika apsvērta, lai novērtētu garenlieces slodzi, izmantojot nesagraujošu eksperimentālu procedūru (*Lurie, Lateral vibrations as related to structural stability*, 1952); (*Johnson*, 1953). Pirmie *VCT*

pētījumi balstījās lineārajā sakarībā starp aksiālās slodzes līmeni un slodzes īpašfrekvences kvadrātu, ko var pierādīt pilnīgi ar vienkārši balstītām kolonnām vai plāksnēm (*Johnson, 1953*) un cilindriskām čaulām (*Leissa A., 1973*); (*Virgin, 2007*):

$$f^2 + p = 1, \quad (2.2)$$

kur f ir attiecība starp noslogoto īpašfrekvenci ω_{mn} un nenoslogoto īpašfrekvenci ω_{mn} , abas saistītas ar vienu un to pašu vibrācijas režīmu, ko definē m aksiālo pusviļņu un n apkārtējo viļņu (cilindriskās čaulas), p ir attiecība starp pielikto slodzi P un linearizēto garenlieces slodzi P_{CR} (no pašu vērtību garenlieces analīzes vai teorētiskajiem garenlieces vienādojumiem).

Pamatojoties uz 2.2. vienādojumu, pēdējās septiņās desmitgadēs tika ierosinātas tiešās un netiešās *VCT* pieejas (*Singer J. A. J., 2002*); pilnīgs šo pētījumu pārskats ir pieejams citētajā grāmatā. Netiešās metodes paredz faktisko robežstāvokļu novērtēšanu, izmantojot *VCT* testu, kura mērķis ir atjaunināt sākotnējo modeli. Šī metodika uzlabo izlieces slodzes novērtēšanu; netiešās metodes piemērs, kas balstās 2.2. vienādojumā, ir atrodamas (*Singer J. A. H., 1979*). Tiešo metožu pamatā ir eksperimentāli noteikta funkcionālā sakarība starp pielikto slodzi un slodzes īpašfrekvenci, lai tieši novērtētu garenlieces slodzi, (*Radhakrishnan, 1973*), (*Souza M. A., 1983*), (*Arbelo M. A., 2014*).

Klasiskā tiešā *VCT* metode sastāv no raksturlīknes f^2 pret p attēlošanas un vislabākās lineārās sakarības aprēķināšanas, pamatojoties uz eksperimentālajiem datiem. Šajā metodē garenlieces slodzi ekstrapolē kā slodzes līmeni, kas saistīts ar slodzes dabiskās frekvences nulles lielumu (*Lurie, Lateral vibrations as related to structural stability, 1952*; *Johnson, 1953*; *Singer J. A. J., 2002*). Pat, ņemot vērā to, ka lineārā sakarība nav spēkā, ja ir citi robežstāvokļi, metode eksperimentālajos pasākumos sniedza pareizus aprēķinus kolonnām ar dažādiem robežstāvokļiem (*Lurie, Lateral vibrations as related to structural stability, 1952*; *Burgreen, 1961*; *Chailleux A., 1975*).

Pamatojoties uz *Singer J. A. J. (Singer J. A. J., 2002)* sniegto detalizēto bibliogrāfisko pārskatu, var secināt, ka klasiskā *VCT* pieeja, ko piemēro plāksņu konstrukcijām, ir vienkārša attiecībā uz konstrukcijām, kas nav jutīgas pret nepilnībām. Piemēram, *Lurie (Lurie, Lateral vibrations as related to structural stability, 1952)* piecdesmitajos gados to neapstiprināja, aplūkojot vienkārši balstītas plakanas plāksnes, *Chailleux u. c. (Chailleux A., 1975)* septiņdesmitajos gados izdevās aprēķināt garenlieces slodzi vienkārši balstītam plakanas plāksnes paraugam ar nelielām nepilnībām, savukārt nesēn *Chaves-Vargas u. c. (Chaves-Vargas M., 2015)* lineāro pieeju piemēroja plakanām ar oglekļa šķiedru stiegotām polimēru plāksnēm.

Dažādi autori ierosināja modificētas *VCT* pieejas, kas paredzētas tādām konstrukcijām, kas ir jutīgas pret nepilnībām, piemēram, izliektas plātnes un cilindriskas čaulas (*Singer J. A. J., 2002*). Pagājušā gadsimta septiņdesmitajos gados *Radhakrishnans (Radhakrishnan, 1973)* ierosināja metodi, kuras pamatā ir klasiskās raksturlīknes galīgās lineārās trajektorijas ekstrapolācija uz pieliktās slodzes asi; autors ieguva precīzus rezultātus, ņemot vērā divus pēdējos mērījumu punktus caurulēm, kas izgatavotas *Hostaphan®* uzņēmumā.

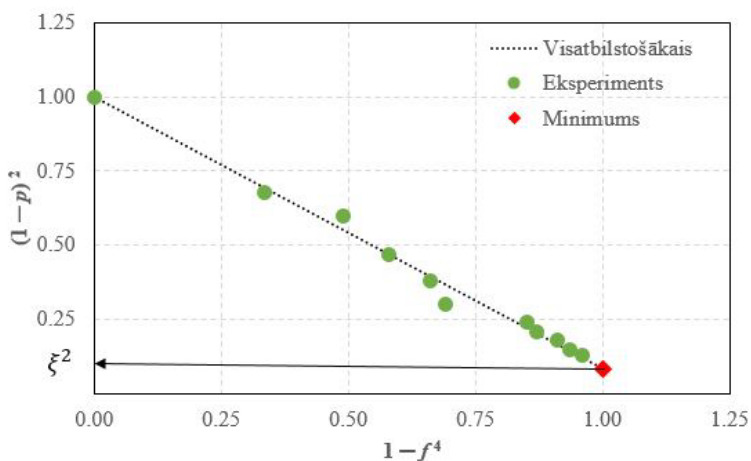
Segals (*Segal, 1980*) izpētīja 35 esošos stingrinātu cilindrisku čaulu *VCT* eksperimentus. Autors pielāgoja optimālo parametru q_{OPT} , lai paaugstinātu īpašfrekvenci F , kurā lineārais labākais pielāgojums novestu slodzes līmeni, kas saistīts ar nulles īpašfrekvences lielumu, līdz eksperimentālajai garenlieces slodzei:

$$F^{q_{OPT}} = A - BP, \quad (2.3)$$

kur A un B ir pielāgošanas konstantes.

Tika ierosināta funkcionāla sakarība starp optimālo parametru q_{OPT} un stingrinātu cilindrisku čaulu galvenajām ģeometriskajām īpašībām. Šajā pētījumā tika panākts ievērojams VCT aprēķināto KDF koeficienta izkliedes samazinājums, salīdzinot ar netiešo VCT metodi, kas balstīta 2.2. vienādojumā. 2.3. vienādojums tika pētīts [15], lai noteiktu optimālo parametru q_{OPT} un līdz ar to arī aprēķinātās garenieces slodzes augšējās un apakšējās robežas.

Tika ierosināta jauna pieeja pret nepilnībām jutīgām stingrinātām cilindriskām čaulām (Souza M. A., 1983). Autori ierosināja modificētu raksturliķni, kas balstīta parametriskās formās $(1-p)^2$ un $1-f^4$, kurā ir sagaidāma lineāra sakarība, kā redzams 2.16. attēlā (Souza M. A., 1983), kur parādīta VCT shēma, kas atspoguļo (Souza M. A., 1983) rezultātus VCT skaidrošanai.



2.16. att. (Souza M. A., 1983) piedāvātais VCT shēmas skats.

Šajā VCT metodē lineāro sakarību iegūst, izmantojot vislabākās atbilstības procedūru, un to ņem vērā, lai novērtētu parametrisko formu $(1-p)^2$, kad slogotā īpašfrekvence ir nulle $1-f^4 = 1$ frekvences parametriskā formā tāpēc šo metodi var izteikt šādi:

$$(1-p)^2 + (1-\xi^2)(1-f^4) = 1, \quad (2.4)$$

kur ξ^2 ir $(1-p)^2$ lielums, kad $1-f^4$ ir vienāds ar vienu, un tas ir slodzes nestspējas krituma kvadrāts, ko rada sākotnējās nepilnības. Pamatojoties uz ξ^2 , garenieces slodzes P_{VCT} aplēse VCT ir šāda:

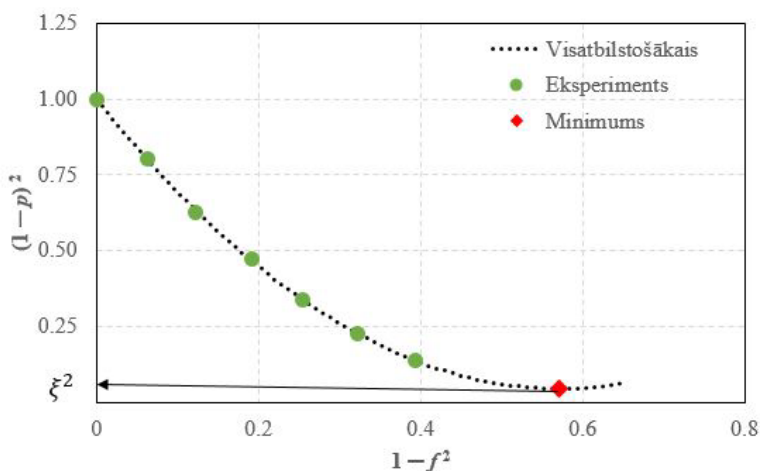
$$P_{VCT} = P_{CR} \left(1 - \sqrt{\xi^2}\right). \quad (2.5)$$

No 2.5. vienādojuma izriet, ka terminu $1 - \sqrt{\xi^2}$ var uzskatīt par KDF γ eksperimentālu aplēsi parasto izmēru noteikšanas metodēm (Weingarten V. I., (Revised 1968), 1965). Cita

metode tika ierosināta, kurā ņemas vērā stingrinātas cilindriskas čaulas (Souza, 1991). Autori tuvināja jeb aproksimēja klasisko raksturlīkni kā kubisku parametrisku līkni. Viņi ierosināja arī Hermīta formu parametrisko vienādojumu definēšanai. Abas aprakstītās metodes (Souza M. A., 1983; Souza, 1991) tika apstiprinātas, ņemot vērā eksperimentālos rezultātus, kas iegūti, testējot stingrinātas cilindriskas čaulas, Technion (Singer J., 1980).

Līdzīgi arī klasiskā raksturlīkne tika attēlota ar otrās kārtas vienādojumu (Abramovich H., 2015). Autori korigēja otrās kārtas vislabākās sakritības attiecību, ko piemēroja izliektiem stingrinātiem paneļiem. Novērtējot aprēķināto garenieces slodzi, ņemot vērā slodzes līmeņus līdz 50 % no lineārās garenieces slodzes, tika iegūti pamatoti rezultāti. Tomēr, lai uzlabotu aplēses, autori ieteica slodzes līmeņus tuvu klasiskās raksturlīknes tipiskajam asajam likumam.

Arbelo u. c. 2014. gadā (Arbelo M. A., 2014) modificēja Souza u. c. darbu (Souza M. A., 1983), ierosinot jaunu VCT, kas balstīta uz raksturlīkni starp parametriskām formām $(1-p)^2$ un $1-f^2$. Autori empīriski pārbaudīja otrās kārtas sakarību, kā parādīts 2.17. attēlā, kurā shematiski attēloti (Arbelo M. A., 2014) rezultāti.



2.17. att. (Arbelo M. A., 2014) piedāvātais VCT shēmas skats.

Otrās kārtas vienādojumu iegūst, izmantojot vislabākās atbilstības procedūru, un tiek uzskatīts, ka ξ^2 tiek novērtēts kā $(1-p)^2$ ass minimālā vērtība. Matemātiski metodi formulē šādi:

$$(1-p)^2 = C_2(1-f^2)^2 + C_1(1-f^2) + C_0, \quad (2.6)$$

kur A, B un C ir pielāgošanas koeficienti, un ξ^2 aprēķina šādi:

$$(1-p)^2 = \xi^2 = -\frac{B^2}{4A} + C. \quad (2.7)$$

Aprēķinātais ξ^2 tiek ņemts vērā, lai novērtētu garenieces slodzi, kā parādīts 2.5. vienādojumā. Jāatzīmē, ka šī metode nav atkarīga no līdzības starp garenieces un vibrācijas režīmiem, bet gan no sākotnējo nepilnību ietekmes uz slodzes frekvences lielumu.

Iepriekš prezentētā metode ir validēta astoņos eksperimentālos pasākumos (Arbelo M. A., 2015), (Kalniņš, 2015), (Skukis E. O. O., 2017), (Franzoni F., 2019), (Skukis E. O. O., 2017),

(Shahgholian Ghahfarokhi, 2018), (Labans, 2019), (Franzoni, 2019), ņemot vērā metāla un laminētas kompozītmateriālu cilindriskās čaulas ar dažādām konstrukcijas detaļām: nestingrinātas (Arbelo M. A., 2015), (Kalniņš, 2015), (Skukis E. O. O., 2017), (Franzoni F., 2019), ar un bez izgriezumiem (Skukis E. O. O., 2017), ar režģi stingrinātas (Shahgholian Ghahfarokhi, 2018), ar cieši izvietotām stiegrām un iekšējo spiedienu (Labans, 2019), un izgatavotas, ņemot vērā vilkšanu mainīgā leņķī (Franzoni, 2019).

2020. gadā Skukis u. c. (Skukis, 2020) modificēja Arbelo u. c. (Arbelo M. A., 2014) darbu, ierosinot jaunu VCT , kura pamatā ir raksturliktne starp parametriskajām formām $(1-p)^2$ un $1-f$. Autori empīriski pārbaudīja otrās kārtas sakarību, kā parādīts 2.17. attēlā, kurā shematiski attēloti rezultāti (Skukis, 2020).

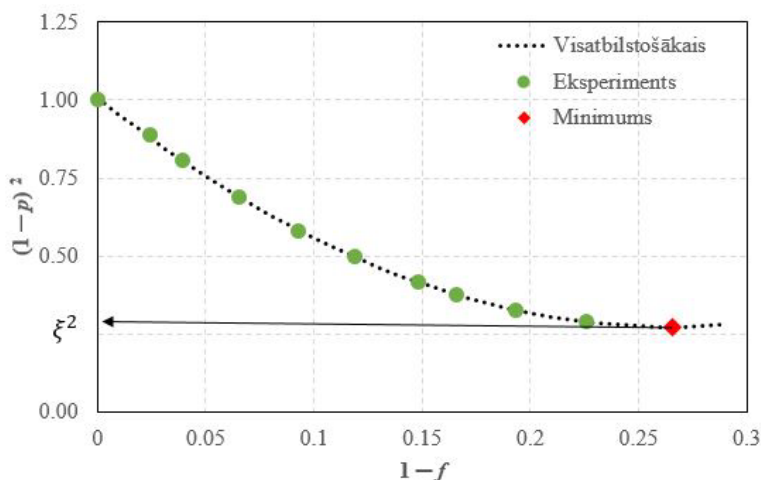
2.6. vienādojuma labās puses forma ir iegūta empīriski, tāpēc šķiet ticams, ka līdzīgas funkcijas ar šo īpašību var izmantot nestabilitātes sākuma vietas noteikšanai. Tika apsvērta 2.6. vienādojuma empīriskā modifikācija, izmantojot otrās kārtas polinomu $1-f$:

$$(1-p)^2 = c_2(1-f^2)^2 + c_1(1-f) + c_0. \quad (2.8)$$

Tad $(1-p)^2$ minimālā vērtība kā $1-f$ funkcija ir izteikta šādi:

$$\frac{d(1-p)^2}{d(1-f)} = 2(1-p) \frac{dp}{df}, \quad (2.9)$$

t. i., nosacījums $dp/df = 0$ ir spēkā pie kritiskās slodzes. Attiecība redzama 2.18. attēlā.



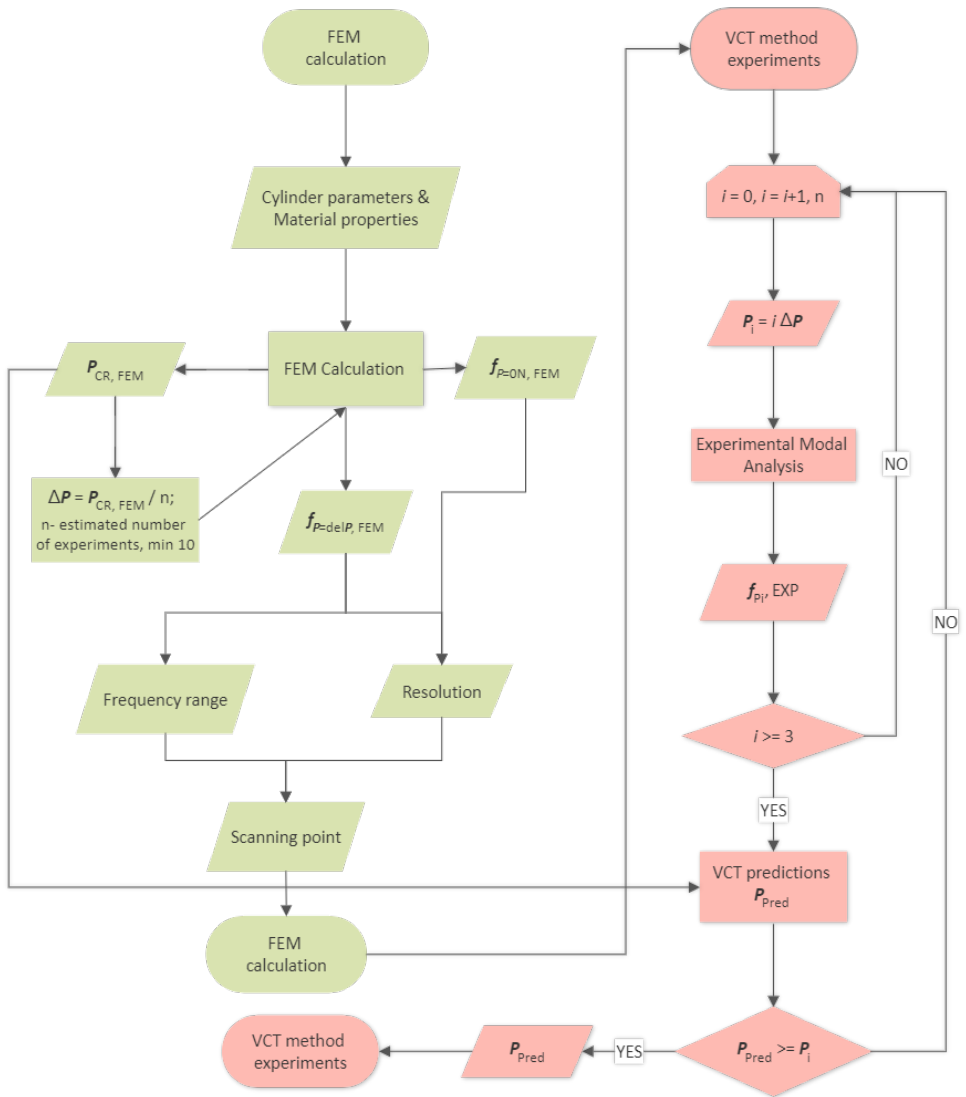
2.18. att. (Skukis, 2020) piedāvātais VCT shēmas skats.

2.3. Algoritma eksperimentālo pasākumu kopums

Pamatojoties uz šajā nodaļā sniegto informāciju, ir izstrādāts algoritms mērījumu veikšanai, izmantojot *VCT* metodi.

1. **Noteikt kritisko slodzi** $P_{CR, FEM}$ un **pirmās īpašfrekvences vērtību** $f_{P=0N, FEM}$, izmantojot galīgo elementu metodi. Kritiskās slodzes vērtība ir vajadzīga, lai pamatojoties uz *VCT*, prognozētu kritisko slodzi. Pirmā īpašfrekvences vērtība, kas iegūta, izmantojot *FEM*, ir nepieciešama, lai pārbaudītu skaitļošanas modeli ar reālu testējamo objektu, kā arī eksperimenta modālo parametru noteikšanai.
2. **Noteikt sloģojuma soli** atkarībā no aprēķinātās kritiskās slodzes $P_{CR, FEM}$, kas norādīta 1. nodaļā. Minimālais soļu skaits, lai aprēķinā paredzētu kritisko spēku, ir 3 qt. $\Delta P = \frac{P_{CR, FEM}}{n}$. Promocijas darba autora ieteikums ir izmantot vismaz $n = 10$ qt.
3. **Noteikt pirmās īpašfrekvences vērtību pie slodzes** $f_{P=\Delta P}$, izmantojot galīgo elementu metodi.
4. Lai noteiktu modeļa eksperimenta parametrus:
 - **frekvenču diapazons:** $0 \dots 5 \cdot f_{P=0N, FEM}$;
 - **izšķirtspēja:** $\max \Delta f = \frac{f_{P=0N, FEM} - f_{P=\Delta P}}{2}$;
 - **skenēšanas punkts:** tas jāizvēlas tā, lai kopējais skenēšanas laiks nepārsniegtu 15 minūtes vai pasūtītāja noteikto laiku.
5. Veikt eksperimentālos modalitātes mērījumus bez sloģojuma. Salīdzināt iegūto pirmo īpašfrekvenci ar aprēķināto frekvenci. **Pārliecināties, ka visi mērījumi atbilst sagaidāmajiem**, iegūto svārstību formu kvalitāte ir atbilstoša izmantošanai.
6. Papildus jāveic divi eksperimentāli modālie mērījumi ar sloģojumu, kas vienāds ar Δf , $2\Delta f$. Tas ir obligātais minimālais datu kopums, lai sāktu uz *VCT* balstītu kritiskās slodzes prognozēšanu.
7. Veikt *VCT* balstītu kritiskās slodzes prognozi.
8. Ja turpmākās izmaiņas slodzes posmā nepārsniedz aprēķināto kritisko slodzi P_{cr} , tad palieliniet slodzi uz ΔP un atkārtojiet mērījumu, pretējā gadījumā pieņemiet, ka kritiskais spēks ir noteikts.

VCT metodes algoritma shematisks attēlojums redzams 2.19. attēlā.



2.19. att. VCT metodes algoritms.

3. REZULTĀTI

Diviem cilindriem tika veikta pārbaude un testēšana, lai noteiktu, kā slogojot samazinās īpašfrekvence plānsienu cilindriskām konstrukcijām, izmantojot vibrāciju korelācijas metodi (*VCT*). Tika izgatavots cilindru komplekts ar 300 mm un 500 mm diametru, tie tika velmēti no *ASI 304* 0,5 mm biezas loksnes, pēc tam savienoti ar plazmas metināšanu. Vispirms eksperimentu modelēja ar galīgo elementu metodes (*FEM*) kodu *ANSYS*. *VCT* modelēšanu ar galīgajiem elementiem var iedalīt divos posmos. Sākotnēji aprēķins tiek veikts, inducējot statisko slodzi čaulas asī un ierobežojot pārvietošanos čaulas otrā galā. Otrajā posmā veic čaulas modālo analīzi, ņemot vērā čaulas sākotnējā analīzē iegūto iepriekš slogoto stāvokli. Pēc tam tika veikts fiziskais eksperiments. Detalizēti rezultāti ir sniegti rakstā *Skukis E., Kalnins K., Chate A, Preliminary assessment of correlation between vibrations and buckling load of stainless steel cylinders, 10. starptautiskā konference "Shell Structures: Theory and Applications" (325. lpp.–328. lpp), Gdaņska; Polija, 2013. gada 16. oktobris.*

Galvenais šī darba secinājums ir apgalvojums, ka gan fizikālā eksperimentā, gan galīgo elementu metodes simulācijā plānkārtu cilindriskām konstrukcijām zem slodzes samazinās īpašfrekvence.

Nākamais ļoti svarīgs solis bija uzlabot kritiskā spēka prognozēšanas precizitāti. Pētījumu analīze šajā jomā liecina, ka iegūtos eksperimentālos datus nepieciešams normalizēt. Arbelo ierosinātā normalizēšanas pieeja ir eksperimentāla pārbaude jaunai pieejai, kurā izmantota vibrācijas korelācijas metode, lai prognozētu reālas garenieces slodzes nedeformētām cilindriskām čaulām, kas ir pakļautas aksiālai spiedei. Tika izgatavotas četras dažādas testa konstrukcijas, kas tika noslogotas līdz ļodzei: divas kompozītmateriālu laminētas cilindriskas čaulas un divi nerūsējošā tērauda cilindri. Lai raksturotu sakarību ar pielikto slodzi, testēšanas laikā, izmantojot 3D lāzerskenneri, tika izmērīta vibrāciju pirmā īpašfrekvence un modeļa forma. Ierosinātā vibrāciju korelācijas metode ļauj prognozēt eksperimentālo garenieces slodzi ar ļoti labu tuvinājumu, faktiski nesasniedzot nestabilitātes punktu. Detalizēti rezultāti ir sniegti rakstā *Kalnins K., Arbelo M. A., Ozolins O., Skukis E., Castro S. G. P., Degenhardt R., Experimental non-destructive test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using vibration correlation technique, Shock and Vibration, 2015, raksta ID 729684.*

Pamatojoties uz pieredzi, kas gūta eksperimentos, kas veikti, izmantojot *VCT* metodi, un iespēju izgatavot cilindrus, kas līdzīgi citu pētnieku izmantotajiem, tika izgatavoti un testēti trīs identiski cilindri. Tos normalizēja, izmantojot Arbelo ierosināto metodi. Šajā pētījumā iegūtie dati ir izklāstīti rakstā *Arbelo M. A., Kalnins K., Ozolins O., Skukis E., Castro S. G. P., Degenhardt R., Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using a vibration correlation technique, Thin-Walled Structures, 94. sējums, 2015, 273. lpp.–279. lpp.*

Galvenais šī darba secinājums – lai nodrošinātu visefektīvāko kritiskā spēka prognozēšanu, jāizmanto pirmā frekvence. Tālāk šis apgalvojums tiks atspēkots, jo ir frekvences, kas eksperimenta laikā izzūd, un tās var būt arī pirmās frekvences atkarībā no parauga ģeometrijas un lieluma. Tāpēc jāizmanto pirmās frekvences, kas saglabājas visā *VCT* testēšanas laikā.

Arbelo ierosinātā normalizēšanas metode nav vienīgā, tās salīdzinājums ar Souza 1983. gadā ierosināto metodi ir sniegts darbā *Skukis E., Ozolins O., Andersons, J., Kalnins, K., Arbelo, M. A., Experimental Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells by Vibration Correlation Technique, Procedia Engineering, 172. sējums, 2017, 1023.–1030. lpp., 12. starptautiskā konference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”, (MBMST 2016); Viļņa; Lietuva, 2016. gada 26. maijs.*

Šajā dokumentā ir sniegti arī optimizēti eksperimentu robežnosacījumi. Optimizācija izslēdz operatora ietekmi uz galīgo rezultātu. Robežnosacījumu ietekmes salīdzinājums ir sniegts rakstā *Skukis E., Ozolins O., Andersons, J., Kalnins, K., Arbelo, M.A., Applicability of the vibration correlation technique for estimation of the buckling load in axial compression of cylindrical isotropic shells with and without circular cutouts, Shock and Vibration, 2017, 29.* Šī raksta galvenais mērķis ir pārbaudīt iespējas prognozēt kritisko spēku cilindriskās čaulās ar acīmredzamiem defektiem.

Galvenais šā darba secinājums ir tāds, ka mainītie robežnosacījumi palielina nestspēju, nepasliktinot kritiskā spēka prognozēšanas precizitāti, izmantojot *VCT* metodi. Šajā darbā ir arī parādīts vienkāršots un uzlabots cilindrisko čaulu ražošanas process, kurā metināto savienojumu aizstāj ar adhezīvu savienojumu, kas arī palielina nestspēju par 35 %. Turklāt, tāpat kā iepriekšējos darbos, visprecīzākā prognozēšana ir novērota diapazonā, kas ir tuvu kritiskajam spēkam. Kritiskā spēka ar defektiem prognozes prasa korekcijas un, visticamāk, citu pieeju kritiskā spēka prognozēšanai.

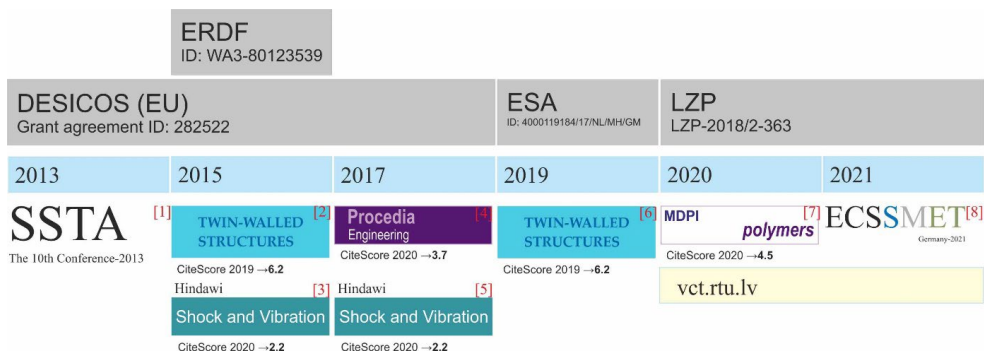
VCT kritiskā spēka prognozēšanas piemērošana dubultai slodzei, ko rada iekšējais spiediens un centrālā spiede, tika pārbaudīta ortotropam cilindram. Šie rezultāti ir sniegti rakstā *Franzoni F., Odermann F., Wilckens D., Skuķis E., Kalniņš K., Arbelo M. A., Degenhardt, R. Assessing the axial buckling load of a pressurized orthotropic cylindrical shell through vibration correlation technique, Thin-Walled Structures, 137.sējums, 2019, 353. lpp.–366. lpp.*

Pētījumi par progresīvāku *VCT* testa datu normalizēšanas metodi daļēji aplūkoti rakstā *Skukis E., Jakobsons G., Andersons J., Ozolins O., Labans E., Kalnins, K. Robustness of empirical vibration correlation techniques for predicting the instability of unstiffened cylindrical composite shells in axial compression, Polymers, 12. sējums, nr. 12, 2020.* Šajā darbā salīdzinātas divas normalizācijas metodes: Arbelo ierosinātā un RTU izstrādātā.

Veicot darbu ar Latvijas Zinātnes padomes granta atbalstu, granta numurs LZP-2018/2-363, tika izveidota tīmekļa vietne <http://vct.rtu.lv/>, kurā tiek ziņots par visām testēšanas procedūrām, tehniku un aprīkojumu, kā arī par 59 cilindru testēšanas rezultātiem. Visi cilindri tika izgatavoti no kompozītmateriāla trīs diametros – 100 mm, 300 mm, 500 mm – ar dažādiem augstumiem no 150 mm līdz 750 mm un divu veidu slāņojumiem, kas optimizēti maksimālai nestspējai attiecīgi ar trīs un četriem slāņiem. Dati ir pieejami vietnē.

Pārskats par kritiskā spēka prognozēšanu, izmantojot *VCT* metodi, sniegts darbā *Skukis E., Kalnins K., Jakobsons G., Ozolins O., Benchmarking of vibration correlation techniques for prediction of buckling load of cylindrical shells, 16. starptautiskā konference “Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing” (ECSSMET), 2021.*

VCT metodes īstenošanas process redzams 3.1. attēlā.



3.1. att. Galvenie rezultāti, kas iegūti, īstenojot *VCT* metodi, kas atspoguļoti publikācijās.

4. NOSLĒGUMA PIEZĪMES

Noslēguma nodaļas 4.1. apakšnodaļā aplūkoti galvenie šī darba sasniegumi, savukārt 4.2. apakšnodaļā sniegti kritiski ieteikumi, 4.3. apakšnodaļā – perspektīva turpmākajiem pētījumiem.

Promocijas darba veikto galveno darbu apkopojums

1. Vispirms eksperimentāli tika apstiprināta korelācija starp slodzes līmeņa palielināšanos un frekvences samazināšanos cilindriskām čaulām. Šis hipotēzes pierādījums ļāva turpināt pētīt *VCT* metodes lietojamību cilindriem ar bojājumiem un bez tiem. Tomēr sākotnējos izmēģinājumos tika konstatēts arī tas, ka, sasniedzot garenlieces slodzes līmeni, īpašfrekvencēm nav tendence būt vienādām ar 0 Hz, kas prasa no jauna definēt kritērijus vai jaunus risinājumus korelācijas pieņēmumu normalizēšanai.
2. Šajā pētījumā tika izgatavoti un eksperimentāli pārbaudīti 76 cilindri, apstiprinot *VCT* metodi. No konkrētajiem testēšanas pasākumiem 17 paraugi bija izotropi, 59 paraugi – ortotropi. Izmēru diapazoni aptvēra R/t attiecību 100...2000, ņemot vērā, ka minimālais cilindra diametrs ir 100 mm, maksimālais – 8000 mm. Līdzīgi eksperimentāli novērtētās sērijas diapazoni $R/h = (1/1 \text{ līdz } 1/4)$. Minimālais augstums – 200 mm, maksimālais – 6000 m.
3. Tika novērtētas piecas dažādas testēšanas iekārtas un iestatījumi, tostarp elektromagnētiskie un hidrauliskie testēšanas stendi, kā arī aksiālās spiedes, aksiālās un lieces un aksiālie un iekšējie spiediena iestatījumi. Šīs testu sērijas aptver četras testēšanas laboratorijas: Rīgas Tehniskās universitātes Materiālu un konstrukciju institūts, Jelgavas Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts, *DLR* Braunšveigas kompozītmateriālu konstrukciju un adaptīvo sistēmu institūts un Drēzdenes *IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH*.
4. *VCT* metodes aprobācija tika demonstrēta uz reāla mēroga objekta – jaunākās paaudzes Eiropas nesējraķetes *Ariane-6* kriogēna tvertnes tās sertifikācijas testēšanas pasākumu laikā. Tika izpētīti divi atsevišķi slodzes gadījumi un apstiprināta *VCT* piemērojamība. Pilna mēroga testos tika apstiprinātas prasības un iestatījumi attiecībā uz frekvenču mērījumu izšķirtspēju, mērīšanas iekārtu izvietojumu un spēju bez problēmām integrēt pilna mēroga strukturālo testu sertifikācijas procedūrā.
5. Kā līmeņatzīme ir izstrādāti un salīdzināti *ANSYS* un *ABAQUS* komerciālo galīgo elementu kodu parametriskie modeļi. Atvērto datu tīmekļa portālā <https://vct.rtu.lv/ansys.html> validēts līmeņatzīmes piemērs, pētniekiem tiek piedāvāts atvērtais pimkods. Pieejami un pārbaudīti gan daudzie robežnosacījumi, gan daudzslāņu kārtojuma secības kombinācijas un materiālu modeļi.
6. Apstiprināts, ka testēšana ar hidrauliskajiem spēka piedziņas mehānismiem ir jāveic rūpīgi, jo iekārtas ierosina fiktīvu frekvenci, kas nemazinās visā slodzes līmeņa pieauguma laikā. Tāpēc ir ļoti svarīgi izolēt vibrāciju avotu un izvairīties no tā.

4.1. Galvenie secinājumi

1. Apstiprināts, ka klasiskā pieeja, kas veido garenieces/pašfrekvences korelāciju līdz 0 Hz, nav derīga kompozītmateriālu cilindriskajām čaulām. Jaunu normalizēšanas pieeju *VCT* prognozēšanai sākotnēji piemēroja un izmantoja *Souze* 1983. gadā. Eksperimentālā darba rezultātā tika izstrādāta normalizācijas metode, ko dēvē arī par *Arbelo* (2014), un izstrādātās metodes turpmākais uzlabojums tika veikts (*Skukis*, 2020), pamatojoties uz statistikas datu kopu, kas aprobēta šī pētniecības darba gaitā.
2. Konstatēts, ka garenieces slodzes prognozēšanas precizitāte, izmantojot gan *Arbelo* piedāvāto *VCT* pieeju, gan *Skuķa* piedāvāto tās empīrisko modificēto pieeju, ir praktiski nejutīga pret čaulas ģeometriju un montāžas un sloģošanas metodēm. Turklāt *VCT* metodes izrādījās noturīgas arī attiecībā uz datu trūkumu par neslogotu čaulas īpašfrekvenci, ko izraisīja, piemēram, nepieciešamība pēc iepriekšsloģojuma, lai nostiprinātu čaulu testa standā. Abām *VCT* metodēm bija tendence nenovērtēt kritisko slodzi čaulām ar salīdzinoši lielām eksperimentālajām *KDF* vērtībām, tādējādi nodrošinot ne tikai tuvu, bet arī konservatīvu robežslodzes kalkulāciju augstas kvalitātes čaulām.
3. Pierādīts, ka modificēts *VCT* ir efektīvs instruments neskartu čaulu nestspējas nesagraujošai prognozēšanai. Prognozētās un eksperimentālās kritiskās slodzes neatbilstība, kas bija mazāka par aptuveni 10 %, tika sasniegta, kad čaulas pamatfrekvences samazināšanās tika novērota pie aksiālām slodzēm, kas pārsniedz 60 % no garenieces slodzes. Turpretī tika konstatēts, ka lokāla garenieces parādīšanās pie izgriezuma pirms čaulas garenieces padara aplūkoto *VCT* čaulām ar caurumiem par nederīgu.

4.2. Rekomendācijas

Izstrādātas testēšanas vadlīnijas vibrācijas korelācijas metodes paplašināšanai, sniedzot vairākus būtiskus ieteikumus.

- Vairāku frekvenču kopa jāanalizē vienlaikus slodzes piemērošanas procesa laikā, uzraugot kopējo frekvences nobīdi un novērtējot statistiski pierādītu atkarību.
- Vislabāko konstrukcijas ierosmes un frekvenču raksturlielumu uztveršanu cilindriskām konstrukcijām varētu īstenot ar skaļruni, kas lokalizēts, izvairoties no kontakta ar testējamo virsmu. Tas samazina gan pievienoto masu, gan kontakta izraisīto frekvences režīma formas novirzi, salīdzinot ar citiem ierosmes veidiem.
- Lāzerskenēšana ir vispiemērotākā metode bezkontakta frekvences noteikšanai, un tā ir gan mērogojama, gan jutīga pret laiku testēšanas pasākumu laikā.
- Nevajadzētu ņemt vērā nulles slodzes līmeni, jo frekvences reakcija var atšķirties, salīdzinot ar faktisko slodzes sadalījuma modeli. Tāpēc par pirmo atskaites punktu *VCT* novērtēšanai jāuzskata slodzes līmenis 5 % apmērā no lineārās garenieces slodzes.
- Statistiskie rādītāji, piemēram, modālā nodrošinājuma kritērijs vai modificētie modālā nodrošinājuma kritēriji, ir obligāti vajadzīgi, lai uzraudzītu reakciju un lai testēšanas vietās atbrīvotos no konstrukcijas fiktīvajām frekvencēm vai frekvenču izkļedēšanās un apvienošanās.

- Ierosināts veids, kā vizualizēt eksperimenta gaitu, attēlojot frekvences pret svārstību amplitūdas intensitāti, tādējādi nodrošinot visaptverošu pārskatu par testa pasākumu gaitu.

4.3. Turpmākās perspektīvas

Darba gaitā noteikti vairāki aspekti, kas būtu jāizvērs turpmākajos pētījumos.

- Iegūtais eksperimentālo datu kopums būtu jāizstrādā tālāk, izstrādājot frekvenču nobīdes metodes, tostarp piemērojot mašīnmācīšanās procesus *VCT* metodei, tādējādi nosakot neslogotās viļņu formas, drošāko konstrukcijas stāvokli un optimālos punktus konstrukcijas frekvenču skenēšanai. Tas jādara, lai paātrinātu un vienkāršotu testēšanas procesu un vienlaikus palielinātu prognozēšanas precizitāti.
- Praktiskai lietojamībai var izstrādāt specializētu (vibrāciju sensoru + *GSM* vai *WiFi* moduli) *IoT* sensoru, lai uzraudzītu noteikto kritisko frekvenču nobīdi un veiktu konstrukcijas uzraudzību.

PATEICĪBA

Paldies visiem tiem cilvēkiem, kas palīdzēja šajā pētniecības projektā, bez kuriem es nebūtu varējis pabeigt šo pētījumu: Materiālu un konstrukciju pētniecības institūta komandai un tās eksperimentālajai bāzei. Saviem kolēģiem, kuri ir samierinājušies ar mana rakstura īpatnībām un mīlestību pret sportu.

Pateicoties Oļģertam Ozoliņam, tika izgatavots liels skaits paraugu, ko pēc tam pārbaudīju. Oļģerts sniedza arī nenovērtējamu ieguldījumu jaunu iekārtu izveidē un iemācīja, kā tās lietot.

Paldies Mariano Arbelo un viņa normalizācijas pieejai, kas joprojām tiek izmantota, prognozējot kritisko izturību ar *VCT* metodi. Šajā pētījumā daudzi paraugi tika testēti ar šo metodi.

Ginta Jēkabsona ieguldījums pētījumā bija liela apjoma eksperimentālo datu matemātiskā apstrāde un palīdzība jaunu normalizācijas pieeju izveidē. Pateicoties Gintam, es atklāju arī *Matlab* iespējas, kas man iepriekš nebija zināmas.

Nenovērtējama ir Jāņa Andersona pieredze eksperimentālo datu analīzē un atspoguļošanā, kas veiksmīgi tika izmantota šajā pētījumā.

Profesora Ričarda Degenharda ieinteresētība šajā pētījumā ļāva veikt eksperimentus ar reālu kosmosa industrijā izmantotu konstrukciju.

Īpašs paldies manam darba vadītājam Kasparam Kalniņam. Pateicoties viņam, es atkal atgriezos doktorantūrā. Viņš deva iespēju piedalīties projektos, kas bija interesanti un kas šo pētījumu pietuvināja loģiskam finālam. Esmu pateicīgs Kasparam arī par viņa pastāvīgo atbalstu un vadību.

Un pats galvenais, liels paldies manai ģimenei par atbalstu, ko esat man snieguši šajā pētījumā! Sievai Irinai, bez kuras es jau sen būtu pārtraucis šīs nodarbības. Apsolu, ka tagad no virtuves galda noņemšu visus papirus!

Visbeidzot, liels paldies visiem dalībniekiem, kuri piedalījās pētījumā un padarīja to iespējamu!

Šo pētījumu finansēja Latvijas Zinātnes padome, granta numurs LZP-2018/2-363.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Abramovich H., G. D. (2015). Buckling prediction of panels using the vibration correlation technique. *Prog. Aerosp. Sci.* 78, 62–73.
2. Arbelo, M. A. (2014). Vibration correlation technique for the estimation of real boundary conditions and buckling load of unstiffened plates and cylindrical shells. 79.
3. Arbelo, M. A. (2015). Experimental and numerical estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using a vibration correlation technique. 94.
4. Avieable P. (2022, 06 02). *Modal Analysis of Cylindrical Structures*. Retrieved from https://www.uml.edu/docs/s-v-jan2001_modal_analysis_tcm18-189939.pdf.
5. Bisagni, C. (2015). Composite cylindrical shells under static and dynamic axial loading: An experimental campaign. *Progress in Aerospace Sciences* 78, (pp. 107–115).
6. Burgreen, D. (1961). End-fixity effect on vibration and instability. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 126 (1), 1058–1073.
7. Castro, S. G. (2014). Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 118–132.
8. Chailleux A., H. Y. (1975). Experimental study of the buckling of laminated composite columns and plates. *Int. J. Mech. Sci.* 17, 489–498.
9. Chaves-Vargas M., D. A.-G.-U. (2015). Modal parameter identification of a compression-loaded CFRP stiffened plate and correlation with its buckling behaviour. *Prog. Aerosp. Sci.* 78, 39–49.
10. Chu, T. H. (1949). *Determination of Buckling Loads by Frequency Measurements*, Ph.D. Thesis. California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA,.
11. Composites, H. (2013). *HexPly® 8552 Product Data*.
12. Datta, P. K. (1973). Buckling and vibration of a thin tensioned sheet with an elliptical hole. *Experimental Mechanics* 13(7), 280–286.
13. Datta, P. K. (1979). Static stability behaviour of plate elements with non-uniform, in-plane stress distribution. *Journal of Mechanical Engineering Science* 21 (5), 363–365.
14. Degenhardt, R. K. (2007). Experiments on buckling and postbuckling of thin-walled CFRP structures using advanced measurement systems. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 7 (02), 337–358.
15. DESICOS. (2019, 05 05). *Shell Buckling Knockdown Factor project by NASA*. Retrieved from <https://s.dlr.de/index.php/sbkf-by-nasa>.
16. ESA. (2019, 05 10). *NASA Has a Crush on You, NASA's Shell Buckling Knockdown Factor (SBKF) project*. Retrieved from <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/sbkf.html>.
17. Evkin, A. (2019). Dynamic energy barrier estimation for spherical shells under external pressure,. *International Journal of Mechanical Sciences* 160, 51–58.
18. Evkin, A. K. (2019). Local buckling of axially compressed cylindrical shells with different boundary conditions. *Thin-Walled Structures* 141, 374–388.
19. Experimental Mechanics 10 (11). (1970). *Recent Experimental Studies on the Buckling of Stringer-Stiffened Cylindrical Shells (Eng. Report TAE No 100)*. Israel Institute of Technology, Haifa, IL.
20. Franzoni F., O. F. (2019). Nondestructive vibration-based method for buckling prediction of unstiffened composite cylindrical shells: experimental study and parametric analysis. *Compos. Struct.*

21. Franzoni, F. D. (2019). Vibration correlation technique for predicting the buckling load of imperfection-sensitive isotropic cylindrical shells: An analytical and numerical verification. *140*.
22. Hamidzadeh H. R., J. R. (2009). *Modal Analysis of Cylindrical Structures*. Boston, MA: Springer.
23. Horton, W. H. (1977). Determination of the critical loads of shells by nondestructive methods. *Experimental Mechanics* 17 (4), 154–160.
24. ISO7626-2. (2015). *Vibration and shock – Experimental determination of mechanical mobility – Part 2: Measurements using single-point translation excitation with an attached vibration*.
25. Johnson, E. G. (1953). The determination of the critical load of a column. *11* (1).
26. Kalnins, K. A. (2015). Experimental Nondestructive Test for Estimation of Buckling Load on Unstiffened Cylindrical Shells Using Vibration Correlation Technique.
27. Kennedy, D. a. (2018). Critical buckling predictions for plates and stiffened panels from natural frequency measurements. *Conference Series 1106*, (p. Journal of Physics:).
28. Kjær, B. (2022, 06 02). *Sound & Vibration Measurement*. Retrieved from <http://hnutest.hnu.edu.cn/pdf/20150826110815181.pdf>.
29. Labans, E. A. (2019). An experimental vibration-buckling investigation on classical and variable angle tow composite shells under axial compression. *449*.
30. Lancaster E.R., C. C. (2000). Paradoxical buckling behaviour of a thin cylindrical shell under axial compression. *International Journal of Mechanical Sciences* 42, 843–864.
31. Leissa, A. (1973). *Vibration of Shells (NASA SP-288)*. Washington: US Government Printing Office.
32. Leissa, A. W. (1973). *Vibration of Shells (NASA SP-288)*, tech. rep. Washington: US Government Printing Office.
33. Lurie, H. (1951). Effective end restraint of columns by frequency measurements. *Journal of the Aeronautical Sciences* 18 (8), 566–567.
34. Lurie, H. (1952). Lateral vibrations as related to structural stability. *ASME J. Appl. Mech.*
35. Maia N., S. J. (1997). *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. UK: Research Studies Press.
36. Mandal, P. (2002). Prediction of buckling load from vibration measurements in New Approaches to Structural Mechanics. *Shells and Biological Structures (eds. Drew, H. and Pellegrino, S.), Solid Mechanics and Its Applications Vol. 104*, 175–188.
37. NASA. (2019, 05 07). *NASA Has a Crush on You, NASA's Shell Buckling Knockdown Factor (SBKF) project*. Retrieved from <https://www.nasa.gov/topics/technology/features/sbkf.html>.
38. Pastora M., B. M. (2012). Modal Assurance Criterion . *MMaMS 2012 , Procedia Engineering* 48, (pp. 543–548).
39. Polytec. (2001). *Polytec Scanning Vibrometer, Theory Manual. PSV, PSV-3D, MSA/MSV, As Of Software 8.5*. Germany: Polytec.
40. Polytec. (2016). *Polytec PSV-E-500 Operating Instructions Manual*. Germany: Polytec.
41. Polytec. (2022, 06 02). *Laser Doppler vibrometry*. Retrieved from <https://www.polytec.com/int/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry>.
42. Radhakrishnan, R. (1973). Prediction of buckling strengths of cylindrical shells from their natural frequencies. *2*.
43. Segal, Y. (1980). *Prediction of buckling load and loading conditions of stiffened shells*. Faculty of Aeronautical Engineering, Technion – Israel Institute of Technology.
44. Shahgholian Ghahfarokhi, R. (2018). Buckling load prediction of grid-stiffened composite cylindrical shells using the vibration correlation technique. *Compos. Sci. Tech.* 167, 470–481.

45. Singer J. (1980). *Buckling Experiments on Shells – A Review of Recent Developments*. Technion Israel Institute of Technology.
46. Singer J., A. H. (1979). Vibration correlation techniques for definition of practical boundary conditions in stiffened shells. *AIAA J.* 17 (7), 762–769.
47. Singer J., A. J. (2002). *Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures, Shells, Built-up Structures, Composites and Additional Topics Vols 2*. New York: John Wiley & Sons.
48. Skukis E., O. O. (2017). Applicability of the Vibration Correlation Technique for Estimation of the Buckling Load in Axial Compression of Cylindrical Isotropic Shells with and without Circular Cutouts.
49. Skukis E., O. O. (2017). Experimental test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells by vibration correlation technique. *Procedia Eng.* 172, (pp. 1023–1030).
50. Skukis, E. J. (2020). Robustness of empirical vibration correlation techniques for predicting the instability of unstiffened cylindrical composite shells in axial compression.
51. Somerfeld, A. (1905). Eine einfache Vorrichtung zur Veranschaulichung des Knickungsvorganges.
52. Souza M. A., F. W. (1983). Review of experimental techniques for thin-walled structures liable to buckling: neutral and unstable buckling. *Exp. Tech.* 7 (9).
53. Souza, M. A. (1991). A new technique for the prediction of buckling loads from nondestructive vibration tests.
54. Theory, M. (2008). *Polytec Scanning Vibrometer*.
55. Virgin, L. (2007). *Vibration of Axially Loaded Structures*. Cambridge University Press: Cambridge.
56. Wagner, H. N. (2017). Robust design criterion for axially loaded cylindrical shells – Simulation and validation. *ThinWalled Structures* 115, 154–162.
57. Wang, L. R.-A. (1966). Effect of boundary conditions on shell buckling. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 92 (6), 101–116.
58. Weingarten V. I., S. P. (1968). *Buckling of Thin-Walled Circular Cylinders*. NASA-SP-8007.
59. Weingarten V. I., S. P. ((Revised 1968), 1965). Buckling of Thin-walled Circular Cylinders (NASA SP-8007). *NASA Space Vehicle Design Criteria – Structures*.
60. Weller, T. a. (1970). Experimental studies on buckling of ring-stiffened conical shells under axial compression. *Experimental Mechanics* 10 (11), 449–457.
61. Wesolowski M. (2010). *Dissertation thesis, Development and validation of an effective inverse technique for characterisation of advanced composite material properties*. Riga, Latvia: RTU.
62. Wilckens, D. (2020). *Buckling tests on unstiffened cylindrical shells (ITOBUCK WP 3) tech. rep.*
63. Zhang Y. H., X. S. (2008). Vibration control of a simply supported cylindrical shell using a laminated piezoelectric actuator. *Acta Mechanica volume* 196, 87–101.
64. Zimmermann, R. K. (2006). Buckling and postbuckling of stringer stiffened fibre composite curved panels—Tests and computations. *Composite Structures* 73, 150–161.



Eduards Skuķis dzimis 1981. gadā Preiļos. Rīgas Tehniskajā universitātes (RTU) Būvniecības fakultātē ieguvis bakalaura (2002) un maģistra grādu (2004). Ir RTU Materiālu un konstrukciju institūta pētnieks ar 20 gadu pieredzi, specializējies mehānikā, skaitliskajos un eksperimentālajos svārstību pētījumos un modālajā analīzē. Veicis pētījumus dažādās programmās: Eiropas Kosmosa aģentūras, Eiropas Reģionālās attīstības fonda, Eiropas Sociālā fonda un Eiropas Komisijas 5.–7. ietvarprogrammas projektos.